



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

도시계획학 석사학위논문

도랑유역 관리에 의한 중권역
유역의 수질 개선 효과 분석

Water Quality Improvement Effects
at the Watershed Scale from Upstream
Catchment Management Practices

2012년 8월

서울대학교 환경대학원
환경계획학과 환경관리전공
김 해 정

도랑유역 관리에 의한 중권역 유역의 수질 개선 효과 분석

Water Quality Improvement Effects at the
Watershed Scale from Upstream Catchment
Management Practices

지도교수 이 도 원

이 논문을 도시계획학 석사학위논문으로 제출함

2012년 8월

서울대학교 환경대학원

환경계획학과 환경관리전공

김 해 정

김해정의 석사학위논문을 인준함

2012년 8월

위 원 장 _____ (인)

부 위 원 장 _____ (인)

위 원 _____ (인)

국문 초록

수자원 관리의 틀로 수질과 유량, 인간과 환경, 육상생태와 육수생태를 통합적으로 고려하는 유역관리의 중요성이 세계적으로 확대되고 있다. 우리나라도 1990년대 후반부터 전국을 한강, 낙동강, 금강, 영산강·섬진강 유역으로 나누어 유역관리의 체계를 마련하기 시작하였고, 물관리 종합대책을 바탕으로 각 유역별 법률에 의거한 수자원(수질) 관리가 이루어지고 있다. 유역관리는 통합수자원관리를 위한 보편적 수단으로서 다양한 이해당사자들의 참여를 기본 원칙으로 삼는다. 이 때 대규모 유역에서는 이해당사자 대표들이 합의하여 유역관리의 목표를 설정하고, 소규모 유역에서는 이해당사자들이 직접 참여하여 유역관리 목표를 실현하기 위한 구체적인 실천 방안을 수립하는 것이 효과적이다.

본 연구에서는 이해당사자 즉 유역에 거주하는 주민들의 참여를 이끌어내기 위해 적합한 유역 규모로 도량유역을 제안하고, 유역모델을 이용한 시나리오 분석을 통해 도량유역 관리에 따라 중권역 유역에서 수질이 개선되는 효과를 확인하였다.

도량유역은 농촌마을을 포함하는 정도의 규모로 한정하고, 도량을 1:25,000 수치지도에서 나타나는 1·2차 하천으로 정의하였다. 금강유역 내 중권역 유역인 보청천 유역을 대상으로 도량유역을 추출한 결과 도량유역은 1,148 곳으로 보청천 유역 면적의 71.8%를 차지하며, 도량유역 중 주민이 거주하여 유역 관리에 참여할 수 있는 유역은 338 곳으로 보청천 유역 면적의 29.9%를 차지하는 것으로 파악되었다. 또한 개별 도량유역의 규모는 평균면적 0.35 km^2 , 유역 내 평균도량연장 1.27 km인 것으로 분석되었다.

도량유역 관리에 의한 중권역 유역의 수질 개선 효과를 파악하기 위하여 물리식을 기반으로 한 분포형 유역모델인 CAMEL(Chemicals, Agricultural Management and Erosion Losses)을 이용하였다. 유역을 분할하는 격자의 크기는 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 로 하였으며, 입출력 시간단위

는 한 시간으로 정하여 모델을 구축하였다. 모의항목은 유량, 유사, COD, T-N, T-P으로 모델의 초기 조건은 2009년 기상자료를 이용하여 모델이 안정화 될 때까지 반복 구동하여 형성하였으며, 2010년의 실측 자료를 이용하여 보정을 실시하였고, 2011년 실측 자료를 이용하여 모델을 검정하였다.

유량의 보검정은 금강홍수통제소 기대교 지점에서 관측된 실시간 유량자료를 이용하였으며, 유사와 수질 항목의 보검정은 평균 8일에 한번 관측되는 환경부 총량측정망의 수질 자료를 이용하여 실시하였다. 보검정 결과 유량은 매우 만족하는 수준의 정확도를 나타내었고, 유사와 수질 항목의 경우 실측 자료가 대체로 비강우시에 수집되어 통계적으로 유의성이 있는 평가는 어려우나 강우사상에 의한 경향성을 잘 나타내는 것으로 파악되었다.

검정된 유역모델을 바탕으로 도량유역에 유역관리 시나리오를 적용하여 수질 개선 효과를 분석하였다. 이때 시나리오를 적용한 공간적 범위는 주민이 거주하는 도량유역으로 전체 유역 면적의 29.9%에 해당하며, 적용한 시나리오는 다음과 같다. 첫째, 도량유역 내 논, 밭, 과수원의 시비량을 50% 줄이는 영양물질 관리, 둘째, 미처리 점오염원 중 축산계의 발생부하량을 100% 줄이는 점오염원 관리, 셋째, 밭 주변으로 독을 조성하고, 넷째, 밭 표면에 벚짚 등을 이용하여 멀칭하는 토양 유실 관리, 다섯째, 주로 산림이 개간되어 형성되었거나 하천변에 위치한 기타재배지와 나지를 초지로 전환하는 토지이용 변화이며, 마지막으로 위의 다섯 가지 시나리오를 복합적으로 적용하였다. 시나리오 적용 결과 모든 시나리오를 복합 적용하는 경우 유사 유달부하량이 4.71% 감소하며, COD, T-N, T-P의 유달부하량은 각각 26.2%, 14.0%, 33.2% 감소하는 것으로 확인되었다. 개별 시나리오 중에서는 밭독을 조성하는 것이 전체 항목에 대해 가장 효과적이었으며, 다음으로 경작지 멀칭이 효과적인 것으로 파악되어 토양 유실을 관리하는 것이 수질 관리에 매우 중요하다는 것을 확인하였다. 토지이용을 변화 시키는 시나리오는 수질 개선 효과가 가장 낮았는데 이는 시나리오가 적용된 기타재배지와 나지가 유역 내에

서 차지하는 면적이 0.11%에 불과하기 때문이다.

지금까지 국내의 유역관리 정책은 중권역 및 대권역 유역에 관심을 두고 있으며, 4대강으로 대변되는 큰 강을 중심으로 관리가 이루어져 왔다. 본 연구는 주민들의 참여가 활발히 이루어질 수 있는 유역의 규모로 도량유역을 제안하고, 연구대상 유역인 보청천 유역 내에서 그 분포를 파악하였으며, 도량유역의 관리를 통해서 실효성 있는 수질 개선 효과를 기대할 수 있음을 확인한 점에서 의의를 가진다. 본 연구에서는 보청천 유역 내 모든 도량유역에 동일한 시나리오를 적용하였으나, 주민들이 참여하여 도량유역의 문제점을 파악하고 그에 대한 관리 방안을 모색한다면 보다 현실적으로 실현 가능한 유역관리가 행해질 수 있으며, 그에 상응하는 수질 개선 효과를 기대할 수 있을 것이다.

주요어: 유역관리, 도량, 수질 개선, 분포형 유역모델, 시나리오 분석, 보청천 유역

학번: 2010-22309

차례

I 서론	1
1. 연구의 배경과 목적	1
2. 연구의 내용과 방법	3
II 선행 연구 검토	4
1. 유역관리	4
2. 도랑에 관한 연구	8
3. 도랑유역의 관리 방안	10
III 연구 대상지	14
1. 대상지 선정	14
2. 보청천 유역 개요	16
3. 수문·수질자료	18
4. 점오염원 자료	22
5. 도랑유역의 문제점	24
IV 도랑유역의 추출과 분석	27
1. 도랑의 정의	27
2. 도랑유역의 추출	30
3. 도랑유역의 분석	40

V 유역모델의 적용	42
1. 유역모델의 선정	42
2. 입력자료 수집과 분석	48
3. 유역모델 구축	55
4. 보정과 검증	56
 VI 도랑유역 관리 시나리오 분석	67
1. 시나리오 작성	67
2. 모델에서 시나리오 구현	69
3. 시나리오 결과와 분석	71
 VII 고찰 및 결론	75
1. 고찰	75
2. 결론	77
 ■ 참고문헌	80

표 차례

표 1. 물관리정책의 시대별 구분(안형기, 2009)	8
표 2. 유역별 도랑 실태조사 현황	9
표 3. 기존의 도랑 실태조사 결과(환경부 2008, 환경부 2009)	10
표 4. 자연형 비점오염 저감시설	12
표 5. 농촌유역에 적용되는 비점오염원의 구조적·비구조적 관리 방안 (EPA, 2008)	13
표 6. 금강 유역과 보청천 유역의 토지이용별 면적과 비율	15
표 7. 2011년 기대교 지점에서 보청천의 수위-유량관계곡선식	19
표 8. 기대교 유역의 강우량과 유량, 유출률	19
표 9. 보청천3 지점의 연평균 수질 항목 농도	21
표 10. 미처리 점오염원의 배출부하량	23
표 11. 오염원그룹별 점오염원 구분표 (국립환경과학원, 2008)	24
표 12. 도랑유역의 문제 사례	25
표 13. 옥천군·보은군·연기군의 하천 분류에 따른 하천차수별 길이와 비 율	30
표 14. 추출된 하천도에 대한 오차행렬	36
표 15. 흐름누적별 정확도(%)	36
표 16. 도랑유역의 면적, 도랑총길이, 수계밀도 분석	41
표 17. 도랑유역 면적	41
표 18. 도랑총길이	41
표 19. 도랑유역 수계밀도	42
표 20. 주요 유역모델의 특성 비교	44
표 21. CAMEL의 주요 입력자료	46
표 22. 토양통별 특성과 면적 (이환주·김환기, 2001, 재인용)	50

표 23. 토지이용별 면적과 비율	51
표 24. 3년간 년 강우량과 일평균 최고 강우량	53
표 25. 월간 유량에 대한 모델의 성능 평가 기준	58
표 26. 유량에 대한 모델의 보검정 정확도 평가 결과	59
표 27. 2008년 점오염원 발생부하량과 시나리오 적용 후 발생부하량	68
표 28. 관리 대상 도량유역에 적용한 시나리오	69
표 29. 시나리오가 적용될 토지이용의 면적과 비율	70
표 30. 시나리오 적용에 따른 2년간 Sediment, COD, T-N, T-P의 유달 부하량 감소	73

그림 차례

그림 1. 연구 내용과 방법	3
그림 2. 유역 내 다양한 토지이용과 물의 흐름	4
그림 3. 유역의 분류(환경부 2003b; Clements J et al. 1996)	5
그림 4. 금강유역과 보청천유역의 토지이용별 비율의 상관성	15
그림 5. 금강유역 내 중권역 유역과 보청천 유역의 위치	16
그림 6. 보청천 유역 DEM	17
그림 7. 보청천 유역 토지이용도	17
그림 8. 보청천 유역의 수위·수질 관측 지점	18
그림 9. 기대교 지점에서의 강우와 유량(2009-2011)	20
그림 10. 2010년 수위측정 오류	20
그림 11. 2011년 수위측정 오류	20
그림 12. 수질과 유량의 상관관계	21

그림 13. 3년간 수질 항목의 농도 변화	22
그림 14. 도랑의 하천분류학적 위치를 나타내는 개념도	28
그림 15. 보은군·옥천군 일대의 하천 분류	30
그림 16. 보청천 유역의 하천차수도	32
그림 17. 도랑유역의 추출 과정	32
그림 18. DEM의 전처리	33
그림 19. 흐름누적도로부터 생성한 하천도	35
그림 20. 기준 자료인 하천차수도와 제작된 하천도 비교	37
그림 21. 도랑유역의 출구 선정	37
그림 22. 보청천 유역 내 도랑유역	38
그림 23. 보청천 유역 내 관리 대상 도랑유역	39
그림 24. 탄소, 질소, 인의 이동(농촌진흥청, 2011)	48
그림 25. 표고(DEM)	49
그림 26. 지표경사도	49
그림 27. 흐름누적도	49
그림 28. 소유역도	49
그림 29. 토양도	51
그림 30. 토지이용도	51
그림 31. 보청천 유역의 우량계 티센망	52
그림 32. 보청천 유역 인근의 연평균 강우량(2009-2011)	52
그림 33. 보청천 유역의 시간별 기상(2009-2011)	54
그림 34. 유량 보정 결과	59
그림 35. 유량 검정 결과	59
그림 36. 관측 유량과 모의 유량의 상관관계 (2010, 보정)	60
그림 37. 관측 유량과 모의 유량의 상관관계 (2011, 검정)	60

그림 38. 유사 보정 결과	62
그림 39. 유사 검정 결과	62
그림 40. 관측 유사량과 모의 유사량의 상관관계 (2010, 보정)	62
그림 41. 관측 유사량과 모의 유사량의 상관관계 (2011, 검정)	62
그림 42. COD 보정 결과	64
그림 43. COD 검정 결과	64
그림 44. COD의 관측 농도와 모의 농도의 상관관계 (2010, 보정)	64
그림 45. COD의 관측 농도와 모의 농도의 상관관계 (2010, 보정)	64
그림 46. T-N 보정 결과	65
그림 47. T-N 검정 결과	65
그림 48. T-N의 관측 농도와 모의 농도의 상관관계 (2010, 보정)	65
그림 49. T-N의 관측 농도와 모의 농도의 상관관계 (2011, 검정)	65
그림 50. T-P 보정 결과	66
그림 51. T-P 검정 결과	66
그림 52. T-P의 관측 농도와 모의 농도의 상관관계 (2010, 보정)	66
그림 53. T-P의 관측 농도와 모의 농도의 상관관계 (2011, 검정)	66
그림 54. 시나리오가 적용될 관리 대상 도랑구역의 분포	70
그림 55. 시나리오 적용에 따른 2년간 Sediment, COD, T-N, T-P 유달 부하량 감소율	74
그림 56. 시나리오 적용에 따른 2년간 Sediment, COD, T-N, T-P 유달 부하량 감소량	74

I 서론

1. 연구의 배경과 목적

1992년 브라질 리우에서 개최된 UN환경개발회의(Conference on Environment and Development)는 지속가능한 발전이라는 용어를 세계적으로 확산시키며 환경에 대한 인식을 재고하는 전환점이 되었다. 이때 수자원 관리에 있어서도 의제 21 제 18장에 통합수자원관리와 이를 구체화하는 관리수단으로서 유역차원의 관리가 핵심내용으로 선언됨으로써 유역 관리에 대한 인식을 확산시키는데 중요한 역할을 하였다(박성제 등, 2003).

우리나라에서 유역 관리 정책은 1990년대에 들어 도입되기 시작하였으며(안형기, 2009), 전국을 한강, 낙동강, 금강, 영산강·섬진강의 주요 4대강 유역으로 나누어 유역관리의 체계를 마련하였다. 현재는 각 유역별 법률에 의거하여 수자원 관리가 이루어지고 있다. 환경부(2006)는 유역을 규모에 따라 대권역(basin), 중권역(subbasin), 소권역/표준유역(watershed)으로 구분하며, 지금까지의 유역관리는 대체로 대권역과 중권역 유역에 치중되어 왔다. 그러나 대유역 차원의 관리는 하향식 방식으로 효과적인 주민참여를 제한하기 때문에 지역의 지식을 활용하는데 한계가 있다(건설교통부 2006; 박성제 등 2006).

최근 선진국에서는 소유역에 점차 관심을 기울이고 있으며, 우리나라에서도 4대강 정비 사업을 계기로 진정한 수자원 관리에 대한 고민이 있었고, 그 대안으로 하천 상류 소유역과 농촌 유역이 관리 되어야 한다는 주장이 제기되었다(김정옥, 2010). 또한 2006년 물환경관리 기본계획에 따른 세부 과제로 ‘우리마을 도랑 살리기’가 포함되면서 2007년부터 현재까지 전국 600곳 이상의 도랑 실태조사가 이루어져 왔다. 이렇듯 기존에 법적·정책적 사각지대에서 방치되었던 작은 하천과 그 유역에 대

한 관심이 증가하고 있다.

본 연구는 이러한 세계적 추세와 국내적 배경을 바탕으로 수자원 관리를 유역관리 차원에서 접근하는 것에 공감하며, 주민의 참여를 활성화할 수 있는 유역관리 규모로 도량유역을 제안한다. 이에 따라 도량유역의 공간적 분포와 환경적 특성을 분석하고, 도량유역에서 수질 오염을 개선하기 위한 유역관리가 행해졌을 때 중권역 유역의 수질에 미치는 효과를 유역모델을 이용하여 파악하는 것을 연구의 목적으로 한다.

2. 연구의 내용과 방법

본 연구는 ‘도랑유역의 관리는 유역 규모의 수질 개선에 효과적이다.’라는 가설을 바탕으로 다음과 같은 순서로 진행되었다. 첫째, 국내외 기존 연구를 바탕으로 도랑유역의 관리가 필요함을 인식하고 그에 적합한 관리 방안을 모색하였으며 둘째, 현재까지 법적·학술적 정의가 명확하지 않은 도랑에 대해 문헌 검토를 통해 정의를 내렸다. 셋째 GIS(Geographical Information System)를 이용하여 연구 대상 유역에서 도랑유역을 추출하고, 그 특성을 분석하였다. 마지막으로 분포형 유역 모델을 이용한 시나리오 분석을 통해 도랑유역의 관리에 따른 중권역 유역 말단지점에서의 수질 개선 효과를 분석하였다.

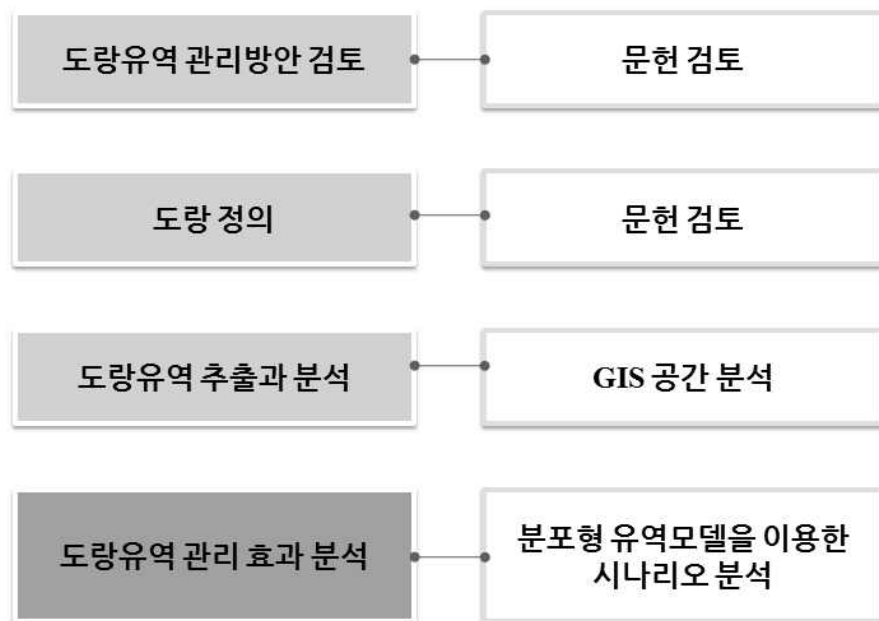


그림 1. 연구 내용과 방법

II 선행 연구 검토

1. 유역 관리

1) 유역의 개념

유역(流域, watershed 혹은 catchment)이란 강수로 인해 하천의 입의 단면에 위치한 단일 출구지점에 유출을 발생시키는 지역의 범위로 정의할 수 있으며, 물의 순환이 이루어지는 기본적인 수문시스템(hydrologic system or hydrologic unit)이다(윤용남, 2007). 환경부에서는 유역의 개념을 수리학적 경계로 둘러싸인 지역으로 지표수, 지하수, 토양, 식생, 동물, 사람과 사람에 의한 영향을 포괄하며, 이러한 유역을 구성하는 요소들이 유기적으로 연결되어 상호작용하는 것으로 정의한다(환경부, 2003a). 다시 말해 유역은 같은 물에 의존하는 동·식물, 사람이 함께 살아가는 터전으로 이들의 생명활동과 자연환경이 상호작용한 결과를 하천의 수질과 유량을 통해 확인할 수 있다.

유역에서는 산림, 농경지, 주거지, 산업시설 등 토지이용이 다양하게 이루어지며, 유역에 내린 비는 이러한 지역을 거쳐 하천으로 흐르거나(overland flow) 땅 속으로 스며든다(filtration)(그림 2). 물이 흐르면서 토사와 오염물질이 하천으로 유입되어 수질에 영향을 미치고, 물이 흐르는 속도와 침투되는 양에 따라 지하수의 수위와 하천의 유량이 결정된다.

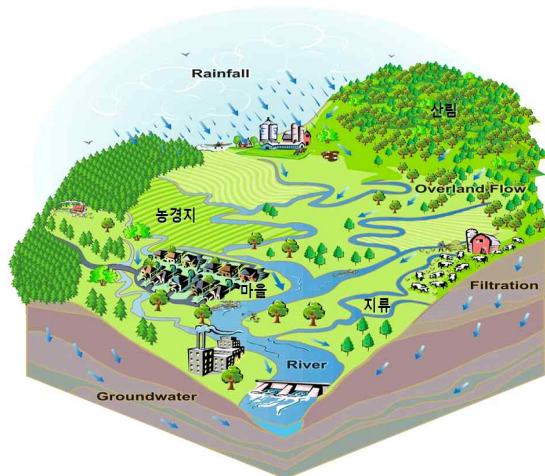


그림 2. 유역 내 다양한 토지이용과 물의 흐름 (출처: <http://prairierivers.org>)

유역은 규모에 따라 대유역(basin), 중유역(subbasin), 소유역(watershed), 단위유역(subwatershed), 집수유역(catchment)으로 구분한다(그림 3)(환경부 2003b; Clements J et al. 1996). 대유역은 다수의 광역 자치단체가 걸쳐있고, 다목적댐 건설로 인한 광역상수원을 포함하고 있는 유역으로 대유역의 수질관리는 환경부가, 이·치수는 국토해양부가 주도하고 있다. 중유역은 상수원 상·하류에 위치하여 광역 자치단체 또는 다수의 기초 자치단체를 포함하는 유역으로 상류에서는 이수 문제가 하류에서는 치수 문제가 중요하게 다루어진다. 소유역은 중유역의 지천에 해당하는 소하천 정도를 포함하는 유역으로 단일 지방 자치단체가 관리하는 경우가 일반적이다. 대유역이나 중유역 규모에서는 유역 관리의 기본방향과 전략을 포함하는 유역관리 기본계획을 수립하는 것이 적합하며, 소유역 규모에서는 상위 유역관리 계획에 부합하는 주민 주도의 하천살리기운동 등 구체적인 프로그램을 개발하는 것이 효과적이다(최지용과 박연상, 2008). 또한 단위유역이나 집수유역은 소유역보다 작은 규모로 유역에서 행해지는 개발 사업, 농업 활동 등으로 부터 직접적인 영향을 받으므로 최적관리기법(Best Management Practices, BMPs), 저영향설계(Site Design)와 같은 구체적인 유역 관리 실천 계획이 요구된다.

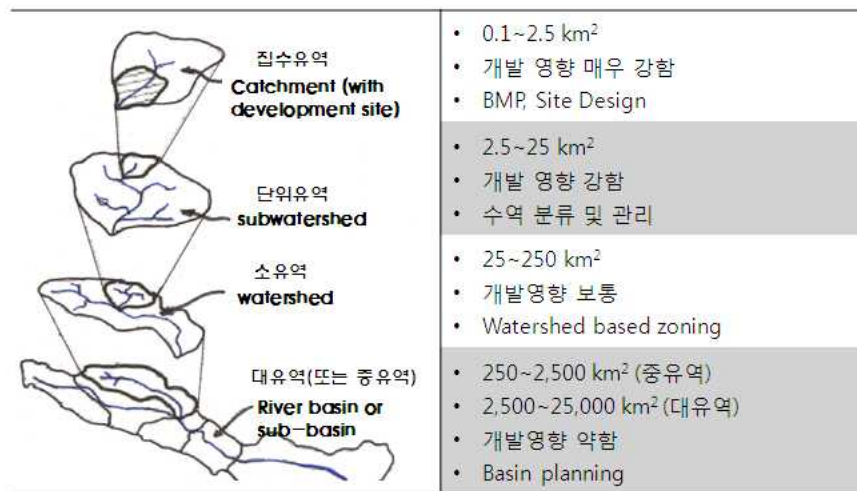


그림 3. 유역의 분류(환경부 2003b; Clements J et al. 1996)

2) 유역관리

1992년 브라질 리우에서 개최된 UN환경개발회의(Conference on Environment and Development)에서는 통합수자원관리(Integrated Water Resources Management, IWRM)와 이를 구체화하는 기본적인 관리수단으로서 유역차원의 수자원 관리가 의제 21 제 18장의 핵심으로 선언되었고, 이를 계기로 유역관리에 대한 인식이 세계적으로 확산되었다.

유역관리는 유역을 관리단위로 하여 유역구성원들의 참여를 바탕으로 정책을 형성하고 의사를 결정하는 민주적인 환경관리시스템이며, 유역환경보호라는 전략적 목표를 달성하기 위한 유기적인 정책의 틀로써 단순히 수질, 수량관리 뿐 아니라 자연환경, 토지이용계획, 산림관리, 하천관리 등 수평적 관계에 있는 여러 부문이 협력하는 시스템을 말한다(환경부 2003a).

국제적으로 1970년대까지의 유역 관리는 대유역(river basin)차원의 관리 형태로서 하향식(top-down) 방식이었다. 대유역차원의 수자원 관리는 전통적으로 지역의 경제개발 측면에서 물을 개발하고 배분하는 문제가 주요 관심사항이었다. 그러나 이러한 하향식 유역 관리는 효과적인 주민참여를 제한하기 때문에 지역의 지식을 활용하는데 어려움이 많았다. 최근에 이르러 선진국에서는 대유역 관리를 위한 행정적인 문제에 대한 관심이 쇠퇴한 반면에 수문학적 지역으로서의 소유역에 대한 관심이 증가하고 있다(건설교통부 2006).

박성제 등(2003)은 1950년대에 시작되었던 미국의 소유역 관리운동(watershed management movement)이 대유역 관리에서 발생할 수 있는 정책공백¹⁾(policy drought)을 극복하기 위한 방법으로 제시되었으며 최근에 명령과 규제 방식에 대한 좌절감, 연방정부에서 비연방정부로의 힘의 이동, 비용효과에 대한 관심 증대 등을 이유로 새롭게 주목받고 있음

1) 정책공백이란 현실적으로 경제적, 환경적, 사회적으로 완전한 수자원사업을 찾는 것은 거의 불가능한데 그러한 복잡한 요인으로 인하여 미국 수자원 정책이 진퇴양난에 빠져 정상적인 정책 수행을 하지 못함을 말한다(박성제 등, 2006, 재인용).

을 언급하였다. 우리나라의 경우에도 여러 연구에서 소유역 단위의 유역 관리 필요성을 제기하고 있다. 김정민(2007)은 효과적인 유역 관리와 이에 따른 수질개선을 이루기 위해 중점 관리가 필요한 곳에 소규모 단위의 유역관리를 시행하고 기존의 광역 유역 단위와 연계해야 한다고 주장하며, 이기완 등(2005)은 함평천을 대상으로 농촌 소유역에서의 수환경 개선 방안과 소유역 협의체 구성방안을 모색하였다. 최지용과 박연상(2008)은 댐 상류유역의 효율적인 유역 관리 단위로 자연, 사회, 문화 등의 특징과 지역 주민의 참여를 통한 관리의 실효성을 제고하기 위하여 소유역과 단위유역을 기반으로 하는 것이 현실적이라고 판단하고 그에 대한 관리 방안을 제시하였다.

3) 우리나라의 유역관리

우리나라에는 1990년대 이후 유역관리 정책이 도입되었다(안형기, 2009)(표1). 1992년도에 처음으로 「수질환경보전법」(현 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」) 제28조의 규정에 따라 전국을 4개의 대권역으로 구분하여 유역관리 계획을 수립하였으나 당시에는 유역별 하수처리장 건설 등 환경기초시설을 늘리는 것에 그쳤으며(김정민 2007), 이후 기존의 사후 정화대책에서 벗어나 사전 오염예방제도를 도입하고 상·하류 주민이 고통과 비용을 분담하는 물관리종합대책을 수계별로 추진하였다. 1998년 한강물관리종합대책을 시작으로 1999년에 낙동강수계물관리종합대책이 수립되었고, 2000년에는 금강과 영산강수계의 물관리종합대책이 수립되어 본격적인 유역관리체제를 구축하기 시작하였다(환경부, 2002). 또한 수계별 물관리대책을 법적으로 뒷받침하기 위해 1999년 「한강수계 상수원수질개선 및 주민지원 등에 관한 법률」과 2002년에는 금강, 낙동강, 영산강·섬진강 수계 각각에서 물관리 및 주민 지원 등에 관한 법률이 제정되어 유역 관리체제에 대한 제도적 틀이 완성되었다. 현재 환경부 산하의 한강, 낙동강, 금강, 영산강 유역환경청이 각 유역에 위치하고 있으며, 유역 관리 업무를 담당하고 있다.

표 1. 물관리정책의 시대별 구분(안형기, 2009)

시대구분	외국의 정책		우리나라의 정책	
	관리 이념	접근 방법	관리 이념	접근 방법
1960년대 이전	- 종합적 개발 - 통합하천관리	- 다목적 저수지 - 유역종합개발	- 하천관리 - 유역종합개발	- 다목적 저수지 - 용수개발 위주
1970년대 1980년대	- 유역관리 도입	- 환경중시 - 재정지원 축소		
1990년대	- 통합수자원관리	- 통합생태관리	- 유역관리 개념 도입	- 환경 중시
2000년대 이후		- 소유역 관리	- 본격적인 유역관리 시작	- 소유역관리 도입

2. 도랑에 관한 연구

현재까지 도랑에 관한 연구는 실태조사 위주로 이루어졌다. 환경부는 2007년부터 「4대강 도랑·실개천 실태조사 사업」을 통해 전국 103곳의 도랑의 형태와 상류·중류·하류의 구간별 오염원, 인근 마을의 취수 형태 등을 현장 조사를 통해 파악한 이래 2009년까지 총 513 곳의 도랑 실태를 조사하였다. 2010년부터는 사업의 주체가 환경부에서 4대강 각 유역환경청으로 변경되었고, 금강유역환경청에서는 2010년과 2011년 각각 54곳의 도랑 실태를 추가로 조사하였으며, 지금까지 조사된 전국의 도랑은 총 621곳이다(표 2). 또한 실태조사가 이루어진 도랑 중 오염이 심하거나 본류에 직접적인 영향을 끼치는 도랑을 선별하여 총 48곳의 도랑에서 복원활동이 이루어졌으며, 환경부 사업과는 별도로 금강유역의 경우 (사)물포럼코리아²⁾, 낙동강유역의 경우 (사)한국생태환경연구소³⁾ 등의 시민단체가 중심이 되어 도랑 복원 사업을 꾸준히 진행하고 있다.

2) 물포럼코리아 홈페이지: <http://www.wfk.or.kr/>

3) 한국생태환경연구소 홈페이지: <http://keei.org/>

표 2. 유역별 도랑 실태조사 현황

조사 년도	과제명	한강	낙동강	금강	영산강 섬진강	총계	연구주체
2011	도랑복원 표준모델 개발 및 사후관리 방안 연구			54		54	금강유역 환경청
2010	금강 유역 도랑 실태조사 및 복원 사례·모델 제시 연구	-	-	54	-	54	금강유역 환경청
2009	4대강 유역 도랑 복원 및 관리 방안 연구	65	60	65	61	251	환경부
2008	5대강 유역 도랑 실태조사·연구	46	40	41	32	159	환경부
2007	4대강 도랑·실개천 실태조사사업	20	29	34	20	103	환경부
유역별 실태조사 소계		131	129	248	113	621	

기존 실태조사에 조사한 항목은 수질(BOD), 도랑 오염원(쓰레기/마을오수/축산폐수/공장폐수/기타), 도랑 인근 마을의 식수원 형태(상수도/마을간이상수도/소규모급수시설/개별지하수), 하천의 인공화 정도(자연하천/인공하천/복개하천), 하상재료(돌/자갈/모래/콘크리트), 단면구조(복단면/단단면), 유역의 하수관거 설치 여부(유/무), 주민인터뷰를 통한 갈수기와 홍수기의 유량 등이다.

하천의 수질등급 중 약간 나쁨인 IV등급 이하인 하천이 28%로 상당수 마을도랑의 수질이 오염되어 있으며, 2009년 도랑 실태조사를 기준으로 오염원은 하천주변의 쓰레기가 가장 빈번하게 관찰되었다. 자연하천 구간은 19%에 그쳤고, 대부분의 구간이 인공적으로 개조(68%)되거나 복개(14%)되었다. 하상이 콘크리트로 된 도랑이 가장 높은 비율(31%)을 차지하는 것 역시 인공화 된 도랑이 많음을 나타낸다. 도랑 인근 마을에 하수관이 설치되지 않은 경우가 53%로 농촌 마을에 기초 환경시설이 부족한 것을 확인할 수 있다(표 3).

기존의 도랑 실태조사가 시사하는 바는 첫째로 하천 본류를 관리하기 위해서는 최상류의 작은 하천인 도랑을 관리해야 하는 중요성을 인지

하기 시작하였다는 점이며, 둘째로 실태조사 결과 상당수의 마을 도랑이 오염되었거나 구조적으로 인공화 되었다는 점이고, 셋째는 지금까지의 도랑 실태조사는 유역 관리의 개념보다는 도랑 하도에 초점이 맞추어졌다는 점이다.

표 3. 기존의 도랑 실태조사 결과(환경부, 2008; 환경부, 2009)

수질 현황(2008년 자료, BOD 기준)							
I a	I b	II	III	IV	V	VI	자료 없음
60 (38%)	31 (19%)	11 (7%)	5 (3%)	9 (6%)	5 (3%)	30 (19%)	6 (4%)
오염원 현황(이하 2009년 자료, 단위 없는 것은 조사한 도랑의 개수)							
쓰레기		마을오수	축산폐수	공장폐수	기타		
137(54%)		75(30%)	15(6%)	15(6%)	11(4%)		
식수원 형태							
상수도		마을간이상수도		소규모급수시설		개별지하수	
7,833가구(50%)		5,998가구(39%)		26가구(0.2%)		1,707가구(11%)	
구조적 특성/형태적 특성							
자연하천구간		인공하천구간		복개하천구간			
41,607m(19%)		151,082m(68%)		30,979m(14%)			
구조적 특성/하상구조							
돌		자갈		모래		콘크리트	
112지점(27%)		105지점(25%)		72지점(17%)		130지점(31%)	
구조적 특성/단면구조				하수관거 설치 유무			
단단면		복단면		설치		설치하지 않음	
230(92%)		21(8%)		118(47%)		133(53%)	

3. 도랑유역의 관리 방안

1) 오염원 관리 전략

하천의 수질에 영향을 미치는 오염물질을 관리하는 전략을 다음과 같이 구분할 수 있다. 첫째 오염물질로 작용하는 물질의 사용 자체를 줄

이는 것으로 예를 들면 비료, 퇴비, 농약 등의 사용량을 줄이는 것이다. 둘째 오염물질이 유발되는 환경을 개선하는 것이다. 토양이 유실되기 쉬운 급경사 지역의 경작지를 테라스 형태로 조성하거나 경작지 표면을 짚 등으로 덮는 멀칭 등의 방법을 예로 들 수 있다. 셋째 오염원의 이동속도를 줄이는 것으로 오염원을 이동시키는 물의 흐름을 제어하거나 혹은 오염원 발생 지역 인근에 오염원 배출을 줄일 수 있는 저류지 등의 시설을 마련하는 것이다. 넷째 오염 발생 지역에서는 멀리 떨어져있으나 관리하고자 하는 수체에 도달하기 전에 오염물질을 제거하는 것이다. 수체에 물이 유입되기 전에 침사지를 거치게 하는 방법 등이 이에 해당한다. 다섯째 오염물질이 수체에 도달하기 전이나 후에 생물학적 혹은 화학적 반응을 이용하여 오염물질을 줄이는 것이다. 하천에 유용미생물군(effective microorganism, EM)을 뿌려주는 방법 등이 그에 해당한다(EPA 2008 참고).

2) 도랑유역에 적합한 관리 방안

김정욱(2010)은 사대강 사업 즉, 대권역 중심의 수자원 관리에 대한 대안으로 진정한 강 살리기의 원칙을 제시하였으며, 그 중 하나로 하천 상류의 소유역과 농촌 유역의 환경개선에 관심을 기울일 것을 강조하였다. 그리고 마을에서 행해지는 문제점으로 도랑에서의 쓰레기 소각, 도랑변 농사, 도랑 상류의 축산시설, 높은 지대의 설비가 제대로 되어있지 않은 고랭지 채소밭 등을 지적하였다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 농촌의 쓰레기 처리 시설, 하수처리 시설 등의 환경기초시설에 해당하는 기반시설을 확립하고 무분별하게 들어서는 매립지나 골프장 등 하천 오염을 유발하는 시설을 관리해야함을 역설한다. 또한 유역관리의 근본 대책은 토지이용을 생태적으로 하는 것으로써, 무리한 축산과 화학농법을 장기적 관점에서 생태적으로 개선해야하며, 비점오염원을 개선하기 위하여 수변지역을 가꾸기를 당부하고 있다.

이러한 도랑유역 내에서 발생하는 구체적인 문제점과 그에 대한 대

책을 염두에 두고 일반적인 오염원 관리 방안 중에서 도랑유역에 적용하기에 적합한 항목에 대하여 살펴보았다.

오염원은 크게 점오염원과 비점오염원⁴⁾으로 분류된다. 국토해양부(2011)의 연구에 따르면 금강유역에서 BOD의 총 배출부하량 중 비점오염원이 73.9%를 차지하며, T-P는 비점오염원이 68.2%를 차지한다. 비점오염원의 비중이 증가하고 있으며 오염원을 예방적 차원에서 관리해야 한다는 점에서 도랑유역 관리에 있어서도 비점오염원 관리 대책이 필수적이라 할 수 있다.

비점오염원 저감시설에는 자연형 시설과 장치형 시설이 있으며 장치형 시설은 주로 오염원 발생지와 떨어져(off-site) 점적으로 관리되며, 자연형 시설은 오염원 발생지 내 혹은 접하여 조성이 된다. 도랑유역에는 인구밀도가 낮고 오염원이 공간적으로 분산되어 있으므로 후처리 보다는 배출부하량을 줄이는 자연형 시설이 효과적이라고 판단된다. 표 4에 비점오염 저감시설 중 자연형 시설의 종류와 내용을 정리하였다.

표 4. 자연형 비점오염 저감시설
(「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률 시행규칙」 별표 6)

종류	내용
저류시설	강우유출수를 저류하여 침전 등에 의하여 비점오염물질을 줄이는 시설로 저류지·연못 등을 포함
인공습지	침전, 여과, 흡착, 미생물 분해, 식생 식물에 의한 정화 등 자연상태의 습지가 보유하고 있는 정화능력을 인위적으로 향상시켜 비점오염물질을 줄이는 시설
침투시설	강우유출수를 지하로 침투시켜 토양의 여과·흡착 작용에 따라 비점오염물질을 줄이는 시설로서 유공 포장, 침투조, 침투저류지, 침투도랑 등을 포함
식생형 시설	토양의 여과·흡착 및 식물의 흡착작용으로 비점오염물질을 줄임과 동시에, 동·식물 서식공간을 제공하면서 녹지경관으로 기능하는 시설로서 식생여과대와 식생수로 등을 포함

4) 점오염원(point source)은 폐수배출시설, 하수발생시설, 축사 등으로서 관거·수로 등을 통하여 일정한 지점으로 수질오염물질을 배출하는 배출원을 말하며, 비점오염원(nonpoint source)이라 함은 도시, 도로, 농지, 산지, 공사장 등으로서 불특정 장소에서 불특정하게 수질오염물질을 배출하는 배출원을 말한다(「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」 제2조).

미국의 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)에서는 도시지역, 농촌지역, 산림지역에 대해 비점오염원 관리 방안을 구조적인 것과 비구조적인 것으로 분류하여 제시한다. 구조적인 방법은 장치를 마련하는 것으로 등고선을 따라 완충식재를 하는 것, 식생형 수로, 식물을 이용한 각종 펜스, 하천 호안의 포장이나 사석 다짐, 유사 저류지, 오수 처리용 인공 연못 등을 포함한다. 비구조적인 방법은 주로 수질관리 전략 중 오염원 발생 자체를 줄이 것에 부합하며 관목 관리, 식생 보존, 보존형 경운, 비료 등 영양물질 관리와 살충제 등 유기물질 관리, 잔여 농산물 관리, 순환형 방목, 그리고 교육 자료를 만드는 것 등이 있다(EPA, 2008). 도랑유역에 적용할 수 있는 농촌유역에 적합한 비점오염 관리 방안을 표 5에 정리하였다.

표 5. 농촌유역에 적용되는 비점오염원의 구조적·비구조적 관리 방안 (EPA, 2008)

Structural Practices	Nonstructural Practices
<ul style="list-style-type: none"> • Contour buffer strips • Grassed waterway • Herbaceous wind barriers • Mulching • Live fascines • Live staking • Livestock exclusion fence • Revetments • Riprap • Sediment basins • Terraces • Waste treatment lagoons 	<ul style="list-style-type: none"> • Brush management • Conservation coverage • Conservation tillage • Educational materials • Erosion and sediment control plan • Nutrient management plan • Pesticide management • Prescribed grazing • Residue management • Requirement for minimum riparian buffer • Rotational grazing • Workshops/training for developing nutrient management plans

Ⅲ 연구 대상지

1. 대상지 선정

도랑유역 관리에 따른 중권역 유역에서의 수질 개선 효과를 파악하기 위하여 보청천 유역을 대상지로 선정하였다. 금강유역은 14곳의 중권역 유역으로 나뉘며 그 중 보청천 유역을 대상지로 선정한 이유는 다음과 같다. 첫째, 보청천 유역은 국제수문개발계획(International Hydrological Program, HIP)의 2단계부터 6단계까지의 금강유역 대표 시험유역으로서 기초 수문자료가 꾸준히 수집·분석되고 있다(건설교통부, 2006). 둘째, 금강수계 내 최상류 유역으로 독립적인 유역 모의가 가능하다. 셋째, 용담댐, 대청댐, 탐정지와 같은 대규모 호소가 없어 수문과정에서 인위적인 왜곡이 비교적 적다(그림 5). 넷째, 토지 이용이 특정 유형에 편중되지 않아 대권역 규모인 금강유역의 표준이 되는 중권역 유역으로 볼 수 있다. 보청천 유역과 금강유역의 토지이용 형태별 비율의 상관관계를 파악하면 결정계수 0.97 정도로 상당히 유사한 것을 확인할 수 있다(표 6, 그림 4).

표 6. 금강 유역과 보청천 유역의 토지이용별 면적과 비율

토지이용	금강수계		보청천	
	면적(km2)	비율(%)	면적(km2)	비율(%)
주거지역	292.5	2.95	10.5	1.89
공업지역	50.7	0.51	0.9	0.17
상업지역	28.0	0.28	0.2	0.04
위락시설지역	2.9	0.03	0.0	0.00
교통지역	102.5	1.03	2.0	0.36
공공시설지역	50.4	0.51	0.8	0.15
논	1,751.1	17.66	84.0	15.18
밭	958.0	9.66	55.7	10.05
하우스재배지	3.5	0.04	0.0	0.00
과수원	113.3	1.14	3.4	0.62
기타재배지	31.2	0.31	0.9	0.16
활엽수림	2,077.0	20.95	120.6	21.78
침엽수림	2,412.6	24.34	141.5	25.57
혼효림	1,459.8	14.73	113.2	20.44
자연초지	43.0	0.43	1.3	0.24
골프장	6.3	0.06	0.0	0.00
기타초지	110.7	1.12	2.4	0.44
내륙습지	55.9	0.56	2.0	0.36
연안습지	0.1	0.00	0.0	0.00
채광지역	6.8	0.07	0.2	0.04
기타 나지	121.1	1.22	6.2	1.12
내륙수	236.2	2.38	7.8	1.41

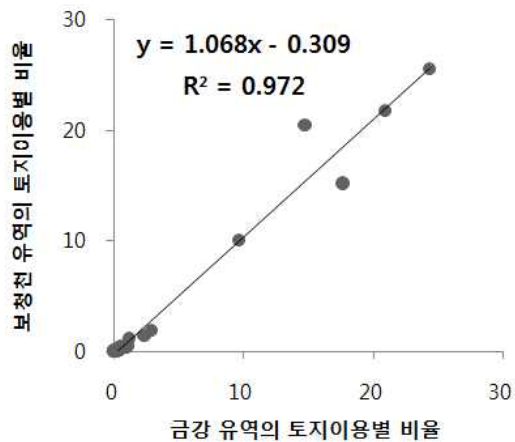


그림 4. 금강유역과 보청천유역의 토지이용별 비율의 상관성

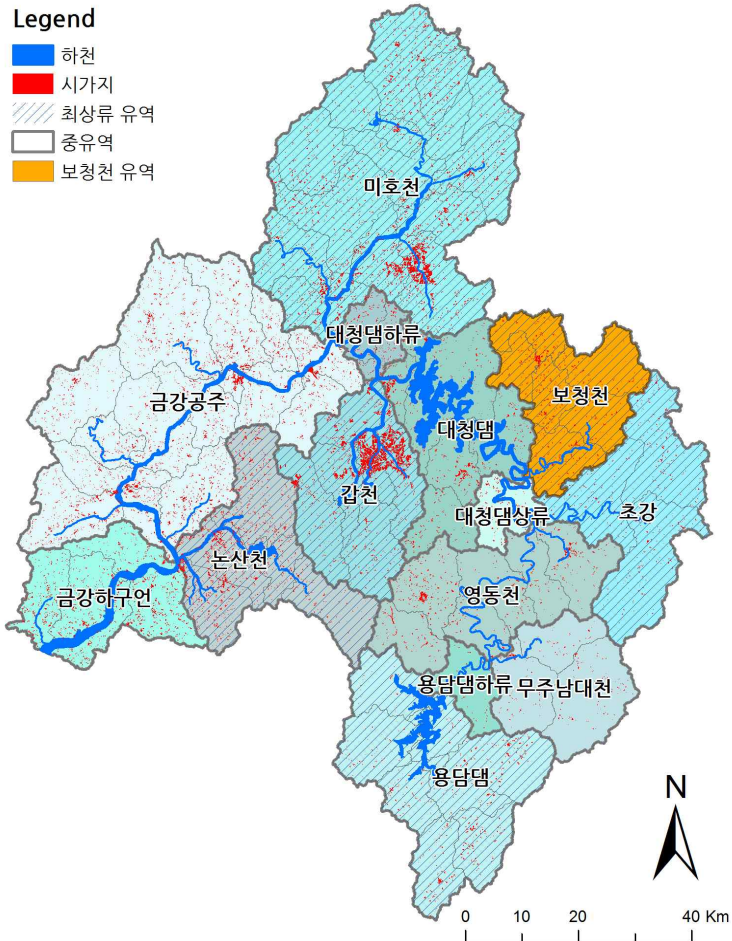


그림 5. 금강유역 내 중권역 유역과 보청천 유역의 위치

2. 보청천 유역 개요

보청천 유역은 금강수계 동부에 위치하며 금강유역(유역면적 9,914.0 km^2 , 유로연장 388.5 km)의 약 5.6%에 해당하는 유역면적 553.5 km^2 , 하천연장 68.1 km의 중권역 유역이다. 보청천 유역의 지류와 본류의 총 연장은 1,689.7 km, 유형의 형상을 나타내는 유역평균폭(A/L)은 8.08 km로 동서방향으로 28 km, 남북방향으로 33km 정도의 역삼각형 형태를 취하고 있어 홍수의 동시 도달에 의한 홍수량 집중이 추정된다(국가수자원관

리종합정보시스템(WAMIS)).

유역의 토지이용은 대부분이 산지로 형성되어 있어 평균고도가 높은 편이며, 유역의 경계부는 높고 하천을 중심으로 좌우안은 비교적 평탄하여 논으로 이용되고 있다(그림 7). 유역면적의 50%에 해당하는 고도인 고도중앙치는 EL. 263.9 m이고, 전유역 면적의 98.7%가 EL. 600m 이하에 위치하고 있다(그림 6). 유역 경사는 32.1%로 비교적 급한 편이고, 하천 경사는 상류가 급하고 하류가 완만한 일반적인 하천의 형태를 취하고 있다(건설교통부, 2006).

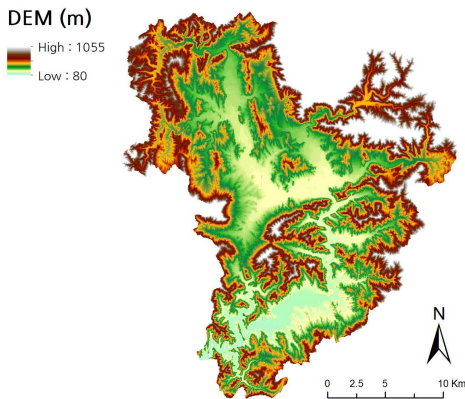


그림 6. 보청천 유역 DEM



그림 7. 보청천 유역 토지이용도

보청천 유역에는 총 6곳의 수위 측정지점(산성교, 이평교, 탄부교, 기대교, 산계교, 청성)이 있으며, 5곳의 하천수 수질 측정지점(보청천1, 보청천2, 보청천3, 보청천4, 향건천)이 있다(그림 8). 수질 측정지점 중 보청천 3지점은 총량측정망으로 평균 8 일에 한번 수질이 측정되며, 그 외의 수질측정 지점은 일반측정망으로 평균 한 달에 한 번 수질이 측정된다.

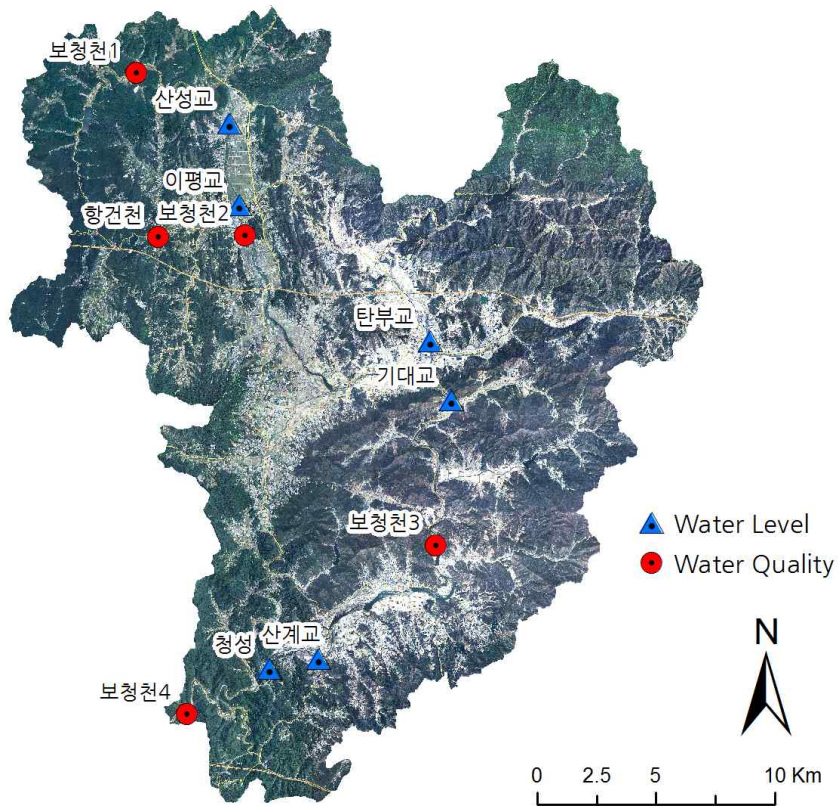


그림 8. 보청천 유역의 수위·수질 관측 지점

3. 수문 · 수질자료

1) 유량

본 연구에서 유량자료는 국토해양부 산하 금강홍수통제소가 운영하고 있는 기대교의 관측 값을 이용하였다. 기대교는 1982년 8월 1일부터 관측을 시작하여 현재까지 실시간으로 수위·유량 자료를 제공하고 있다. 유량은 수위 관측 자료에 수위-유량관계곡선식을 적용하여 산출하는데, 기대교의 경우 2007년에 관계식이 산정된 후 매년 관계식이 산정되지 않아 2011년 수위-유량관계곡선식(금강홍수통제소 미공개 자료)을 일괄 적용하였다(표 7).

2009년에서 2011년까지 3년간 강우량과 유량을 살펴보면, 2011년은 예년에 비해 월등하게 강우량이 많았음에도 유량이 2010년과 크게 차이가 나지 않는다(그림 9, 표 8). 이는 수위관측기의 고장으로 2010년과 2011년 각각 수위 측정에 오류가 있었기 때문인 것으로 추정된다. 2010년에는 8월 17일부터 8월 23일까지 약 6일간 수위가 과대 측정되었고(그림 10), 2011년에는 6월10일부터 7월 20일까지 약 40일간 강우 시에도 수위의 변화가 기록되지 않아 수위가 과소 측정되었다(그림 11). 이를 감안할 때 기대교 유역의 연 유출률은 50% 내외가 될 것으로 추정된다.

**표 7. 2011년 기대교 지점에서 보청천의 수위-유량관계곡선식
(금강홍수통제소 제공)**

적용 수위(m)	수위-유량관계곡선식	비 고	
$0.76 \leq h \leq 1.60$	$Q = 41.690 \times (h - 0.760)^{2.351}$	0.96m 이하 외삽	11/01/01 00:00 ~11/08/10 06:50
$0.70 \leq h \leq 1.60$	$Q = 35.269 \times (h - 0.700)^{2.303}$		11/08/10 07:00 ~11/12/31 23:50
$1.60 < h \leq 3.60$	$Q = 24.372 \times (h - 0.550)^{2.601}$		전 기간
$3.60 < h \leq 8.30$	$Q = 15.227 \times (h + 0.500)^{2.389}$	5.56m 이상 외삽	

Q: discharge (m³/s) h: water level (m)

표 8. 기대교 유역의 강우량과 유량, 유출률

Year	Rainfall (mm)	Runoff (mm)	Runoff Ratio
2009	1,014.3	433.0	0.43
2010	1,215.5	730.8	0.60
2011	1,810.7	736.1	0.41

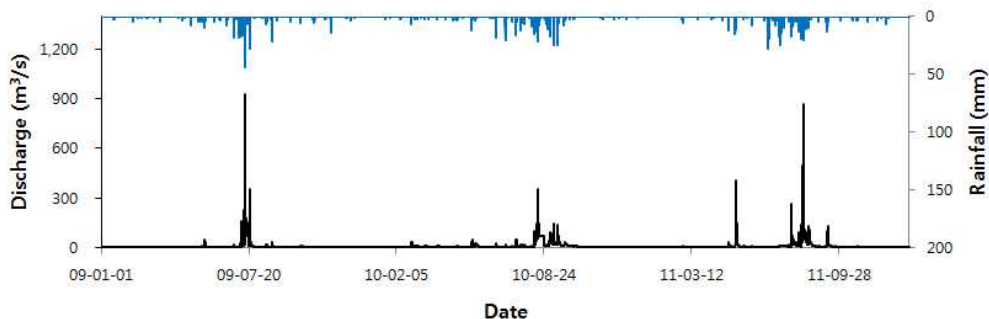


그림 9. 기대교 지점에서의 강우와 유량(2009-2011)

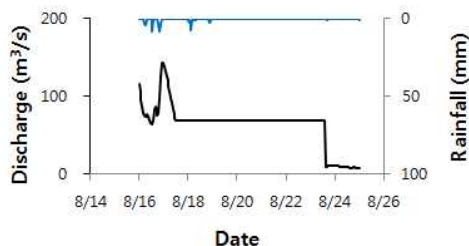


그림 10. 2010년 수위측정 오류

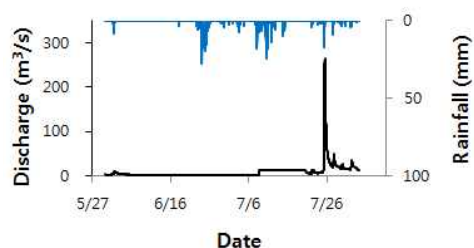


그림 11. 2011년 수위측정 오류

2) 수질

본 연구에서는 보청천3 지점의 환경부 수질오염 총량측정망 수질자료를 이용하였다. 총량측정망에서 조사되는 수질 항목은 수온, pH, DO, 전기전도도, BOD, COD, 부유물질(Suspended Solid, SS), 총질소(Total Nitrogen, T-N), 총인(Total Phosphorous, T-P), 총유기탄소(Total Organic Carbon, TOC)이다(환경부, 2011). 이중 부유물질, COD, 총질소, 총인의 농도를 2009년부터 3년간 살펴보았다(그림 13, 표 9). 부유물질, COD, 총인의 경우 매년 농도가 증가하여 2011년의 농도가 가장 높았으며 총질소의 경우 2009년에 가장 높은 값을 나타내었다. 유량과 수질 항목과의 상관관계를 보면 분석기간 동안 부유물질과, 총인은 유량과 강한 상관관계를 보이며, 총질소는 거의 상관관계를 나타내지 않는다(그림 12).

표 9. 보청천3 지점의 연평균 수질 항목 농도
(환경부 물환경정보시스템 총량측정망 자료)

	SS (mg/L)	COD (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)
2009	5.540	3.490	2.519	0.033
2010	7.915	3.632	2.120	0.048
2011	11.962	3.983	2.265	0.061

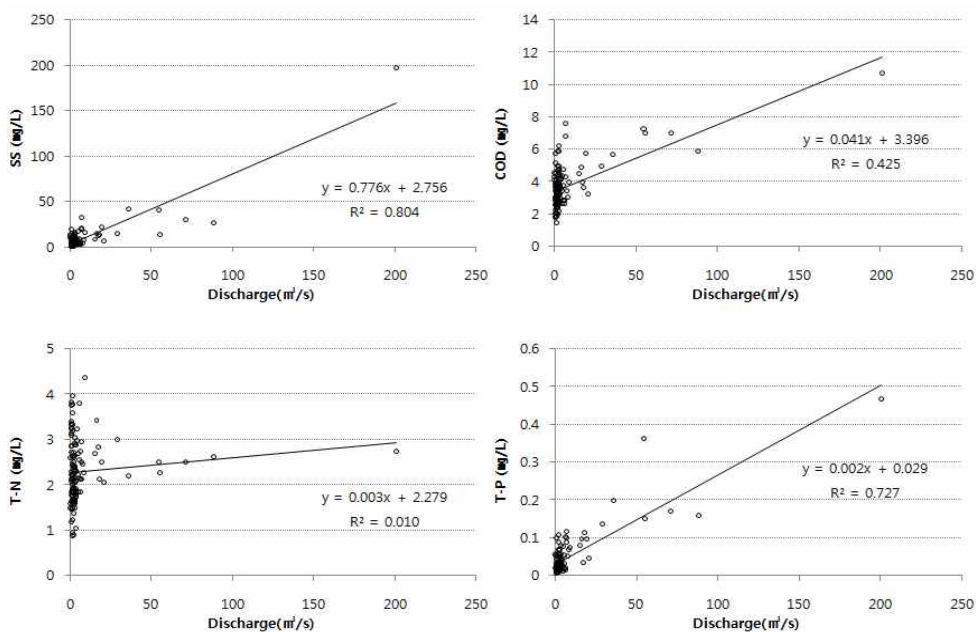


그림 12. 수질과 유량의 상관관계

수질 항목별로 시간에 따른 농도변화를 살펴보면 부유물질은 집중우가 내리는 7월경에 최고값을 나타낸다. 총인의 경우도 농도가 5월부터 꾸준히 증가하여 7월경에 최고값을 나타낸다. COD는 여름철에 높고 겨울철에 낮은 경향을 보인다. 총질소는 연초나 5월경에 상당히 높은 값을 보이며 이는 농사를 지을 때 시비 시기와 연관이 있을 것으로 추정된다(그림 13).

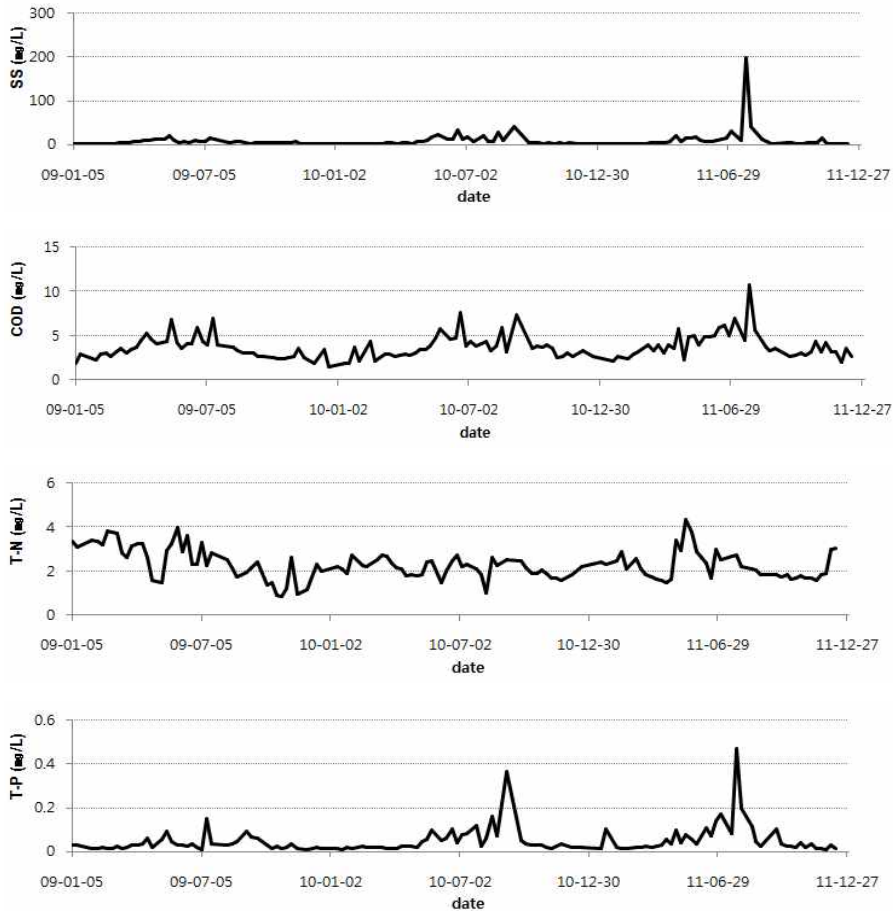


그림 13. 3년간 수질 항목의 농도 변화

4. 점오염원 자료

본 연구에서 수질모의를 위한 점오염원 자료로 하수처리장의 방류수질과 미처리 점오염원의 발생부하량을 고려하였다.

보청천 유역에는 2곳의 하수처리장이 있다. 보은읍에 위치한 보은하수처리장은 보은읍과 수한면의 하수처리를 위해 1993년부터 가동하기 시작하였다. 하루 처리 용량이 6.6 톤으로 실제 방류수질은 SS 2.5 (mg/L), COD 5.6 (mg/L), T-N 4.245 (mg/L), T-P 0.429 (mg/L)이다. 마로면에

위치한 마로하수처리장은 2006년부터 가동하기 시작하였으며 마로면과 탄부면의 하수를 처리한다. 하루 처리 용량은 0.5 톤으로 실제 방류 수질은 SS 2.5 (mg/L), COD 6.1 (mg/L), T-N 8.137 (mg/L), T-P 1.172 (mg/L)이다(WAMIS, 하수처리장 운영현황).

미처리 점오염원은 2008년 동리별 발생부하량을 이용하였다. 대상 유역에서 BOD는 하루에 4,592.2kg T-N은 2,959.1 kg, T-P는 277.2 kg 이 발생된다. BOD와 T-N, T-P 모두 토지계에서 발생하는 부하량이 각각 45.1%, 56.9%, 45.2%로 가장 높은 비중을 차지하며, 다음으로 축산계에서 발생하는 부하량이 각각 35.7%, 31.1%, 38.7%로 두 번째로 높은 비중을 차지한다(표 10). 각 오염원 항목에 대한 설명은 표 11에 정리하였다.

표 10. 미처리 점오염원의 배출부하량

구분	BOD		T-N		T-P	
	배출부하량 (kg/day)	비율 (%)	배출부하량 (kg/day)	비율 (%)	배출부하량 (kg/day)	비율 (%)
합계	4,592.2		2,959.1		277.2	
생활계	582.2	12.7%	231.6	7.8%	25.8	9.3%
축산계	1,637.6	35.7%	920.3	31.1%	107.2	38.7%
산업계	11.2	0.2%	6.3	0.2%	1.2	0.4%
토지계	2,071.8	45.1%	1,682.9	56.9%	125.3	45.2%
양식계	44.5	1.0%	8.7	0.3%	2.3	0.8%
방류부하	13.0	0.3%	63.7	2.2%	9.3	3.3%

표 11. 오염원 그룹별 점오염원 구분표 (국립환경과학원, 2008)

오염원 그룹	점오염원
생활계	<ul style="list-style-type: none"> - 개별배출수: 생활하수가 환경기초시설로 유입되지 않는 구역의 가정 및 영업장으로부터 공공수역으로 배출되는 생활계 배출수 - 환경기초시설 방류수: 공공수역으로 방류되는 환경기초시설의 생활계 방류수 - 생활계 관거누수 및 미처리배제수
축산계	<ul style="list-style-type: none"> - 개별배출수: 개별축사로부터 처리 또는 미처리되어 공공수역으로 배출되는 폐수 성상의 축산계 배출수 - 환경기초시설 방류수 : 공공수역으로 방류되는 환경기초시설의 축산계 방류수 - 축산계 관거누수 및 미처리배제수
산업계	<ul style="list-style-type: none"> - 개별배출수: 개별배출시설로부터 처리되어 공공수역으로 배출되는 산업계 배출수 - 환경기초시설 방류수 : 공공수역으로 방류되는 환경기초시설의 산업계 방류수 - 산업계 관거누수 및 미처리배제수
토지계	<ul style="list-style-type: none"> - 환경기초시설 방류수 : 공공수역으로 방류되는 환경기초시설의 토지계 방류수 - 토지계 관거누수 및 미처리배제수
양식계	<ul style="list-style-type: none"> - 개별배출수: 개별양식장으로부터 처리 또는 미처리되어 공공수역으로 배출되는 양식계 배출수 - 환경기초시설 방류수 : 공공수역으로 방류되는 환경기초시설의 양식계 방류수 - 양식계 관거누수 및 미처리배제수
매립계	<ul style="list-style-type: none"> - 개별배출수: 개별 침출수처리시설로부터 처리되어 공공수역으로 배출되는 매립계 배출수 - 환경기초시설 방류수 : 공공수역으로 방류되는 환경기초시설의 매립계 방류수 - 매립계 관거누수 및 미처리배제수

5. 도랑유역의 문제점

2011년 6월 28일, 10월 27일~30일까지 5일 간 보청천 유역 내에 마을이 존재하는 도랑유역을 답사하였고 여러 가지 관리상의 문제를 확인하였다. 도랑유역의 문제 사례를 표 12에 다섯 가지 유형으로 구분하여 정리하였다.

기존에 행해진 실태조사 연구에서 확인한 바와 같이 쓰레기로 인한 도랑의 오염은 아주 흔하게 발견되었다. 도랑 내에 쓰레기가 버려진 경

우는 다반사였고, 쓰레기를 태운 흔적도 많았으며, 유역 내에 축산분뇨를 임시로 쌓아 놓은 경우도 있었다. 수질오염에 집적적인 영향을 미칠 수 있는 축사가 도랑에 인접하여 배치되어 축산분뇨나 처리수가 도랑으로 직접 유출될 수 있는 문제가 잠재되어 있으며, 심지어 도랑 위를 가로질러 임시건물을 세우고 소를 키우는 축산농가도 있었다. 도랑 옆 유희지를 밭으로 개간한 사례도 흔하게 나타났다. 이런 경우 강우 시 토사가 유실되기 쉬우며, 농약이나 살충제 등 유기물질 또한 도랑에 직접 유입되는 문제가 있다. 일부 마을 상류의 산림 내에 흐르는 도랑을 제외하고는 정도의 차이는 있으나 대부분 콘크리트나 호안 블록 등으로 인공화되었는데 그 중 일부는 그 깊이가 지나치게 깊어 사람이 접근할 수 없을 뿐만 아니라 도랑 양쪽 호안에 식생대 같은 완충구간이 전혀 없어 위험할 정도였다. 10월 말 답사에서는 물이 전혀 흐르지 않는 도랑을 다수 확인하였다. 산림 내의 도랑, 농업용 저수지 하류 혹은 농경지를 지나는 도랑, 마을 내의 도랑 등 도랑이 건천화 된 유역의 특성이 다양하였다.

표 12. 도랑유역의 문제 사례

1. 쓰레기나 유기물 관리 부실



(a) 원남 3리 (2011.6.28.)



(b) 봉계리 (2011.10.29.)

2. 도랑 옆에 축사가 인접하여 들어섬



(a) 천남 2리 (2011.6.28.)



(b) 덕동 2리 (2011.10.30.)

표 12. 도랑유역의 문제 사례(계속)

3. 도랑에 접하여 경작지 조성



(a) 문암리 (2011.6.28.)



(b) 서원리 2구(2011.6.28.)

4. 도랑을 수로화하면서 접근이 불가능함

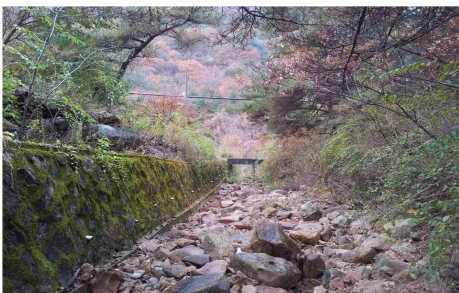


(a) 구티리 (2011.6.28.)

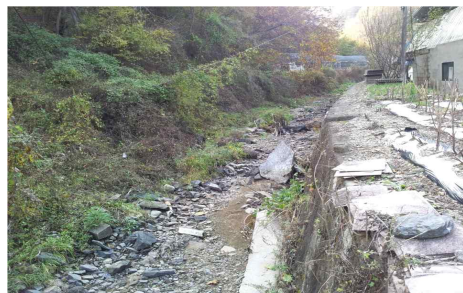


(b) 지산리(2011.10.29.)

5. 도랑의 건천화



(a) 만수리(2011.10.29.)



(b) 묘금리(2011.10.30.)

IV 도랑유역의 추출과 분석

1. 도랑의 정의

도랑유역을 파악하기 위해서는 도랑에 대한 명확한 정의가 필요하다. 도랑에 대한 실태조사가 꾸준히 시행되어 왔음에도 불구하고 도랑에 대한 법적, 학술적 규정은 명확하지 않다. 강살리기네트워크에서는 도랑을 소하천 중에서 관리가 되지 않고 정부에 등록되지 않으며 폭이 5 m 내외, 평균수심 최소 10 cm 이상인 농촌 마을 앞을 지나는 하천이라고 정의하였으나(이용곤, 2011) 이 정의가 마땅한가에 대해서는 고민해볼 여지가 있다. 본 연구에서는 도랑을 개념적으로 정의하고, 그 개념을 포용하는 기술적인 정의를 내림으로써 도랑을 공간정보로 분석할 수 있도록 하였다.

1) 개념적 정의

도랑은 학술적이기 보다 생활에서 쓰이던 단어로 일반적으로 인지되는 도랑이 어떠한지 파악하기 위해 도랑에 관한 속담을 검토하였다⁵⁾. 속담을 통해 파악할 수 있는 도랑에 대한 인식은 규모의 측면에서는 좁은 배수로에서 제법 걸어 다닐 수 있는 정도의 범위이며 물이 깊지 않고 접

5) 네이버 국어사전, 도랑에 대한 속담/관용구 검색

‘도랑 치고 가재 잡는다.’는 속담은 한 가지 일로 두 가지 이익을 보는 경우를 비유적으로 이르는 말로 많이 쓰인다. 이때의 도랑은 사람이 들어가서 걸어 다닐 수 있을 정도로 폭이 넉넉하고 수심이 깊지 않으며 바위나 돌 등이 하상이나 수변에 있는 하천을 생각할 수 있다. ‘도랑에 든 소’라는 속담은 도랑에 든 소가 양쪽 둔덕의 풀을 뜯어먹을 수 있듯이 먹을 것이 많아 유복한 처지에 있는 경우를 비유하는 말이다. 역시 소가 들어갈 수 있는 정도의 폭과 깊이이며, 양쪽 둔덕이 너무 멀지 않은 정도일 것이다. 또 다른 속담 ‘가물에 도랑 친다.’는 가물에 도랑을 친다는 것으로 미리 대책을 세워 두어야 함을 이르는 말이다. 이때의 도랑은 배수로의 기능을 하는 좁은 물길 정도로 생각할 수 있다.

근하기 쉬운 특징을 가진다.

또한 마을을 나타내는 동(洞)이라는 한자를 뜯어보면 사용하는 물(水)이 같은(同) 곳이라는 뜻이 들어있으며 즉, 마을은 한 유역 안에 위치하여 같은 물을 공유하는 단위라는 뜻을 함축하고 있다(이도원, 2004, 재인용). 이를 역으로 해석하면 도랑은 마을을 포함하는 정도의 유역 규모에서 형성되는 물질로 이해할 수 있다.

다음으로 우리나라 하천체계에서 도랑의 위상을 고려하면 법으로 정의되는 하천 중 가장 작은 규모인 소하천 보다 작은 물질로 법적인 규정이 없는 비법정(非法定) 하천이라 할 수 있다. 참고로 소하천의 물리적인 지정기준은 일시적이 아닌 유수(流水)가 있거나 있을 것이 예상되는 구역으로서 평균 하천 폭이 2미터 이상이고, 시점(始點)에서 종점(終點)까지의 전체길이가 500미터 이상인 것이다(「소하천정비법시행령」 2조).

이상의 내용을 바탕으로 우리나라 농촌지역에서 도랑의 하천분류학적 위치를 개념적으로 나타내면 그림 14와 같다. 마을 상류의 산림에서 발원하여 마을을 지나 마을 외부에 흐르는 좀 더 큰 하천으로 유입되는 물질 혹은 마을 인근의 산림 안에서 흐르기 시작하여 역시 더 큰 하천으로 유입되는 물질 등을 도랑이라 할 수 있다.

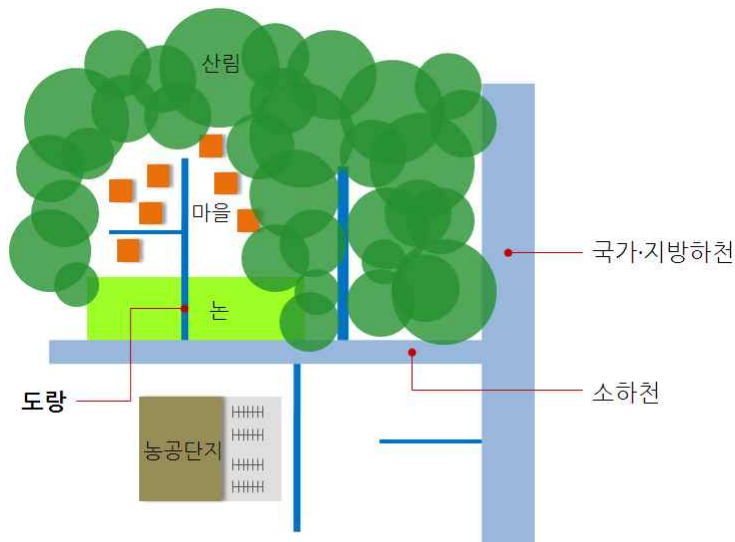


그림 14. 도랑의 하천분류학적 위치를 나타내는 개념도

2) 기술적 정의

하천은 상류일수록 규모가 작고 하류로 갈수록 여러 물길이 합류하면서 큰 하천이 된다. 앞서 고려한 정성적 개념의 도량을 적합하게 구현하는 정량적 개념을 도출하기 위해 하천체계에 따른 하천차수를 분석하였다.

우리나라의 하천체계는 국가하천, 지방하천, 소하천으로 구분되며, 옥천군, 보은군, 연기군을 대상으로 하천의 분류에 따른 하천차수별 길이를 분석하였다. 그 결과 국가하천과 지방하천은 절대적으로 3·4차 이상의 하천이었으며, 소하천의 경우 1차, 2차, 3·4차가 30.3%, 32.4%, 35.7%로 비슷한 비율로 나타났다. 법적 규정이 없는 미분류 하천의 경우는 1차 하천이 60%, 2차 하천이 26.3%로 2차 이하의 하천이 대부분을 차지하였다(표 13).

1차 하천은 가장 작은 물길이지만 상당부분 소하천으로 지정되었는데 이것은 하천의 시점에서 종점까지 최원연장 전체를 소하천으로 지정한 경우 때문이며, 2차 하천의 경우 소하천으로 지정된 하천과 지정되지 않은 하천이 혼재한다. 3차 이상의 하천은 대부분 소하천 혹은 지방하천으로 지정되었으나 13.7%는 지정되지 않은 채 남아있다. 이것은 특별자치도지사·시장·군수 또는 구청장이 하천의 명칭과 구간을 지정하여야 소하천으로 지정이 되기 때문으로(「소하천정비법」 2·3조) 미정의 의미이지 규모나 특성이 소하천에 부합하지 않는 것은 아니다. 그림 15는 보은군과 옥천군 일대에서 대청호로 흘러가는 하천을 유형별로 나타낸 것으로 비슷한 규모의 하천이 일부는 소하천으로 지정되었고 일부는 아직 미분류 하천으로 남아있는 것을 확인할 수 있다.

이상의 결과를 바탕으로 3차 이상의 하천은 소하천으로 지정하기에 충분한 규모이고, 2차 하천은 일부는 소하천 지정 규정에 부합하지만 대체로 소하천 보다 작은 규모인 것으로 추정된다. 따라서 본 연구에서는 도량을 소하천 보다 작은 규모의 물길로 하천차수를 기준으로 1:25,000 수치지도에서 나타나는 1·2차 규모의 하천으로 정의하였다.

표 13. 옥천군·보은군·연기군의 하천 분류에 따른 하천차수별 길이와 비율

하천 차수	국가하천		지방하천		소하천		미분류 하천	
	길이(m)	%	길이(m)	%	길이(m)	%	길이(m)	%
1차	-		6,464	1.8	247,494	30.3	2,089,206	60.0
2차	-		8,666	2.4	265,300	32.4	917,139	26.3
3·4차	3,463	2.9	158,349	43.2	291,691	35.7	478,303	13.7
5차 이상	114,795	97.1	193,026	52.7	13,302	1.6	-	
총 길이	118,258		366,505		817,787		3,484,648	

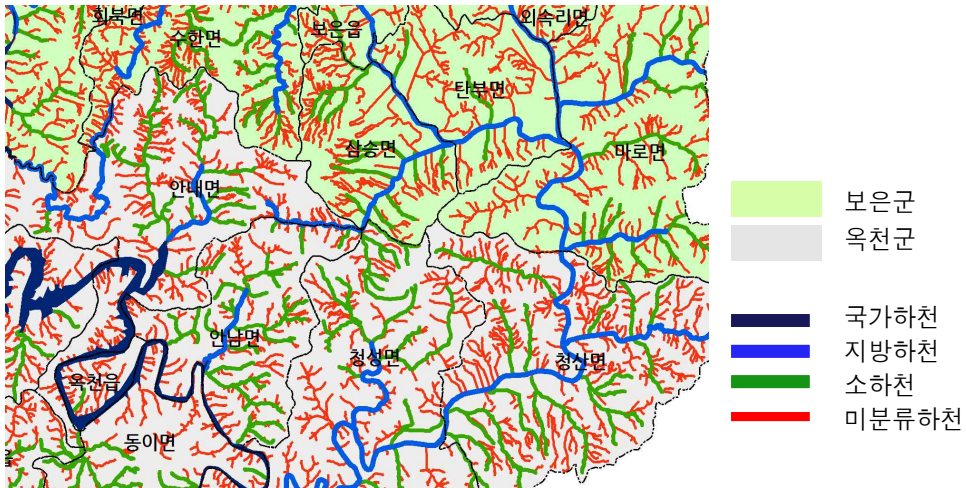


그림 15. 보은군·옥천군 일대의 하천 분류

2. 도랑유역의 추출

앞 절의 도랑에 대한 기술적 정의를 바탕으로 보청천 유역을 대상으로 GIS의 수문분석 기능에서 구동되는 Arc Hydro Tools version 1.3을 이용하여 도랑유역을 추출하였다. GIS의 수문분석 기능은 지형자료를 입력자료로 하여 하천을 추출하며, 이 때 추출된 하천의 정확성을 검증하기 위해서는 실측된 하천 정보가 필요하다.

1) 도랑유역 추출을 위한 자료

(1) DEM(digital elevation map)

본 연구에서 도랑유역을 추출하기 위해 국토지리정보원에서 제작한 10m DEM을 사용하였다. DEM 격자의 크기는 지형의 경사와 유역면적 그리고 유출에도 영향을 미치기 때문에 (이정규 외, 2004; 양인태 외, 2002; 정인주 외 2002) 분석의 대상과 목적에 따라 해상도를 적절하게 결정해야 한다. 본 연구에 적합한 DEM 해상도를 결정하기 위해 10m DEM과 30m DEM을 이용하여 시범적으로 물길을 추출해 비교해 보았다. 그 결과 30m DEM으로부터 작성한 물길의 경우 일부 언덕을 가로지르는 오류가 나타났으며, 이격거리가 짧은 일부 하천은 병합되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 도랑유역의 공간분석을 위해서는 10m 해상도의 DEM이 적합하다고 판단하였다.

(2) 하천차수도

국토해양부에서 제작한 하천차수도는 1:25,000 수치지도에서 하천관련 레이어인 2111(실폭하천), 2112(세류), 2113(건천), 2114(호수, 저수지), 2115(하천중심선)을 추출하여 하천과 호수의 중심선을 연결하고 방향성을 부여한 후 Strahler ordering 원칙에 따라 차수를 부여해 만든 지도이다.

보청천 유역의 하천차수를 분석한 결과 최고 차수는 7차 하천이며, 총 연장은 약 1,692 km이다. 전체 하천 연장에서 1차 하천이 차지하는 비율이 55.4%이며, 2차 하천 22.9%, 3차 하천 9.8%로 하천의 차수가 증가할수록 총 연장은 지수적으로 감소한다. 그림 16에 보청천 유역의 하천 차수도를 나타내었다.

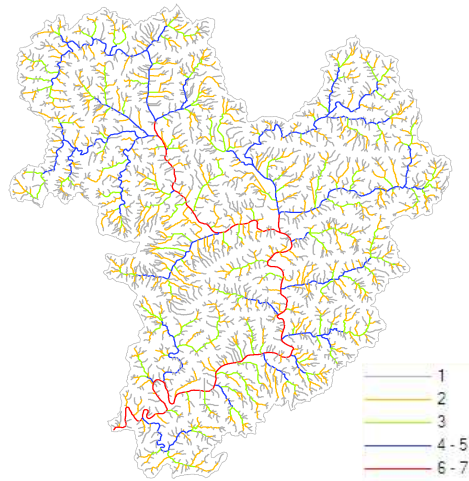


그림 16. 보청천 유역의 하천차수도

2) 도랑유역 추출

그림 17은 도랑유역을 추출하는 과정을 나타낸다. DEM을 입력 자료로 하여 물이 흐르는 흐름방향도를 형성하며, 흐름방향이 같은 상류 셀을 합하여 흐름누적도를 생성한다. 이 때 하천을 형성하는 흐름의 최소값을 지정함으로써 하천을 추출하며, 추출된 하천에 대하여 하천의 차수를 부여한다. 다음으로 도랑의 출구로 1·2차 하천이 3차 하천과 만나는 지점을 추출한 후, 최종적으로 도랑 출구로부터 물의 흐름방향을 역으로 추적하여 도랑유역을 추출한다.

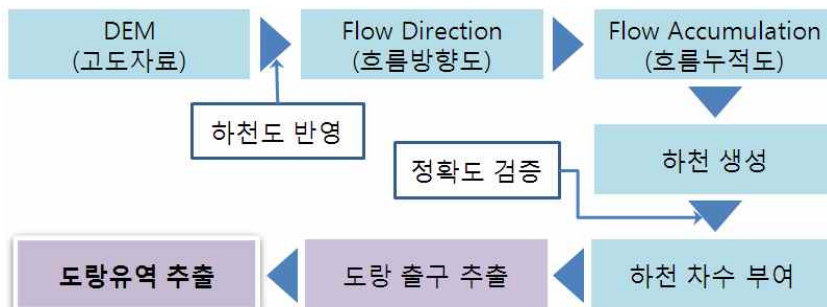


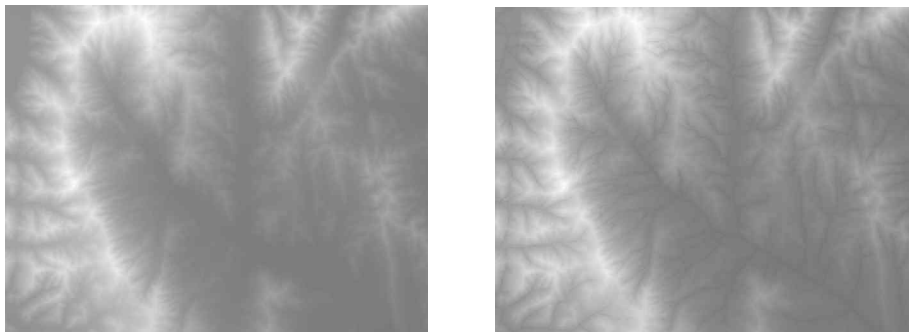
그림 17. 도랑유역의 추출 과정

(1) DEM의 전처리

DEM 원본 자료에 도면의 접합과정에서 발생된 것으로 보이는 데이터가 유실된 선형의 픽셀을 확인하였고, 유실된 격자의 고도 값을 neighborhood기능의 focal statistics를 이용하여 인접하는 3개 셀의 최빈도 값을 채우는 방식으로 메웠다.

또한 실제의 하천을 반영하기 위해 DEM에 하천도를 반영하였는데, 이것은 DEM에서 하천도와 일치하는 격자의 고도 값을 일정부분 낮추는 방법으로 구현된다(그림 18).

하천도를 반영한 DEM에 대해 Sink/Fill 작업을 수행하였다. 이 작업은 DEM의 한 격자가 주변 격자에 비해 고도 값이 작을 경우, GIS 수문 분석을 통해 물길을 추적할 수 없으므로 이를 수정해 주는 과정이다. 이 작업을 수행하지 않으면 다음 과정인 흐름방향도가 적절하게 형성되지 않는다.



(a) 원본 10m DEM

(b) 하천도를 반영한 DEM

그림 18. DEM의 전처리

(2) 흐름방향도와 흐름누적도 생성

흐름방향도(Flow Direction)는 DEM을 입력 데이터로 하여 각 셀에서 물의 흐름방향을 정의한 자료를 말한다. 기준 셀과 기준 셀에 인접한 8 방향의 고도 값을 인식하여 경사가 가장 큰 곳으로 방향을 정의한

다. 직선방향의 경우 셀 사이의 거리는 셀의 크기와 같으며 대각선 방향의 경우 셀 크기의 $\sqrt{2}$ 배가 된다.

흐름누적도(Flow Accumulation)는 흐름방향도를 입력 자료로 하여 자신의 셀로 들어오는 상류의 셀의 개수를 모두 더한 것이다. 따라서 정상인 경우 인접하는 모든 셀보다 고도가 높으므로 0값을 가지며 하천의 하류로 갈수록 흐름누적의 값이 커지고 유역의 출구지점에서 최댓값이 된다.

(3) 하천 생성과 하천 생성 임계값에 따른 정확도 검증

흐름누적도를 바탕으로 상수 셀의 개수가 임계값 이상인 격자를 선택하여 하천도를 생성하였다. 하천도 생성 시 상류로부터 유입되는 셀의 개수를 1000, 500, 200으로 설정하여 하천도를 작성하였으며, 하천차수도와 가장 일치하는 임계값을 선정하였다. 본 연구에서 흐름누적을 조절하여 하천이 나타나는 임계값을 정한 이유는 하천의 차수는 시점을 어디로 보느냐에 따라 변하는데, 실측을 바탕으로 한 수치지도와 이를 이용하여 작성된 하천차수도에 하천의 시점에 대한 규정이 없으며, 일부 지역에서는 상류의 작은 하천이 누락된 것을 파악했기 때문이다. 흐름누적 임계값을 이용하면 일관된 하천 시작점을 정의할 수 있으며, 하천 정보가 없는 경우에도 DEM으로부터 하천을 추출할 수 있다. 흐름누적의 값을 변화시켜 추출한 하천의 모습은 그림 19과 같으며 임계값이 작아질수록 하천도의 밀도가 높아지는 것을 알 수 있다.

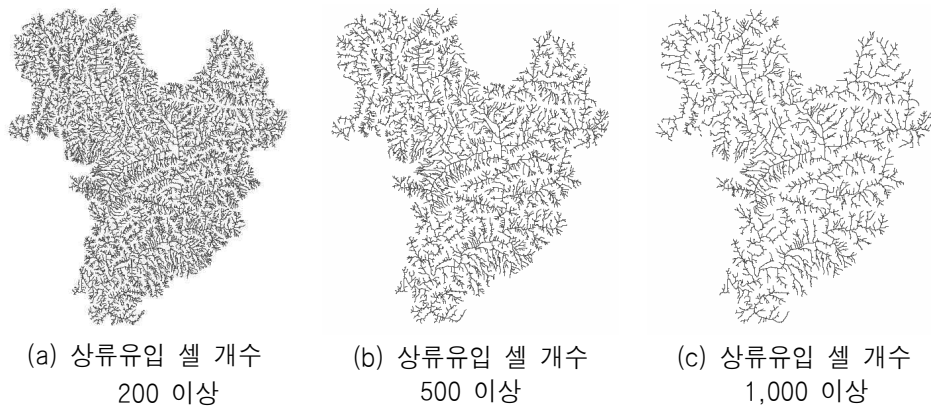


그림 19. 흐름누적도로부터 생성한 하천도

GIS 수문분석을 통해 생성된 하천도의 공간자료로써 활용 가치를 평가하기 위해 정확도 검증을 실시하였다. 이용한 검증 방법은 원격탐사에서 영상분류의 정확도를 객관적으로 평가하는 매트릭스 오류(Error Matrix) 기법이다. 매트릭스 오류에서는 전체정확도(overall accuracy), 제작자 정확도(producer's accuracy), 사용자 정확도(user's accuracy)를 평가한다.

전체정확도(overall accuracy)는 생산된 자료와 기준이 되는 자료가 정확하게 맞는 격자의 수를 전체의 격자수로 나누어 계산한다. 제작자 정확도(producer's accuracy)는 누락오차(omission error)에 대한 측정치로 정확하게 제작된 격자의 수를 기준이 되는 자료의 총 격자 개수로 나누어 계산하며, 제작한 자료의 값이 기준이 되는 자료의 값과 일치하는 정도를 나타낸다. 사용자 정확도(user's accuracy)는 수행오차(commission error)에 대한 측정치로 기준이 되는 자료가 제작된 자료와 일치하는 격자의 수를 제작된 자료의 총 격자수로 나누어 계산한다 (Congalton RG, 1991).

본 연구에서 제작된 자료는 하천 형성의 임계값을 상류 유역의 면적 $0.1/0.05/0.02 \text{ km}^2$ 으로 다르게 하여 추출한 하천도이며, 기준이 되는 자료는 하천차수도이다. 매트릭스 오류의 원칙은 격자의 일치 여부를 따지는

것이지만 본 연구에서는 매트릭스 오류 평가의 원리를 이용하여 일치하는 하천영역의 길이를 기준으로 정확도를 평가하였다(그림 20). 추출된 하천에 대한 오차행렬은 표 14와 같으며 오차행렬을 바탕으로 계산한 정확도 결과는 표 15과 같다.

표 14. 추출된 하천도에 대한 오차행렬

상류 흐름누적 면적(km ²)	기준하천 기준(m)		제작하천 기준(m)	
0.1	누락	601,312	추가	95,081
	일치	1,172,156	일치	1,130,535
	계	1,773,468	계	1,225,616
0.05	누락	361,566	추가	225,512
	일치	1,411,902	일치	1,475,110
	계	1,773,468	계	1,700,622
0.02	누락	109,095	추가	876,604
	일치	1,664,373	일치	1,685,467
	계	1,773,468	계	2,562,071

표 15. 흐름누적별 정확도(%)

상류 흐름누적 면적(km ²)	전체정확도 overall accuracy	제작자정확도 omission error	사용자정확도 commission error
0.1	61.9	66.1	92.2
0.05	71.5	70.5	86.7
0.02	63.1	93.8	65.8

표 14의 결과를 살펴보면 전체 정확도는 흐름누적의 임계값을 0.05 km²로 정의했을 때 71.5%로 가장 정확한 것으로 분석되었으나 정확도 정도의 차이는 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 전체 정확도의 차이는 크지 않더라도 임계값 0.05 km²의 경우 추출된 하천의 총 연장은 하천차수도의 총 연장의 98.36%로 상당히 비슷하며, 도량유역의 추출에서 중요한 기준인 하천차수의 경우도 기준이 되는 하천차수도와 동일하게 7차로

나타났다. 이에 따라 본 연구에서 도랑을 추출하기 위한 임계값으로 10m DEM에 대해 상류 셀 500 개에 해당하는 상류 유역 면적 0.05 km^2 를 선정하였다.

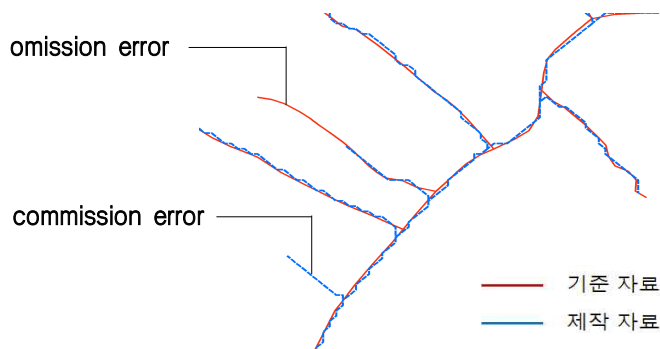


그림 20. 기준 자료인 하천차수도와 제작된 하천도 비교

(4) 하천 차수 부여와 도랑유역의 출구 선정

하천 형성의 임계값으로 누적흐름 0.05 km^2 를 이용해 작성한 하천도를 Strahler ordering 방법을 적용하여 하천차수를 부여하였다. 그리고 도랑으로 정의한 1, 2차 하천이 3차 이상의 하천과 만나는 점을 기준으로 도랑유역의 출구를 추출하였다. 이 때 선택된 도랑 출구는 3차 하천으로 유입되기 직전의 격자여야 한다. 그림 21에 도랑과 도랑출구, 3차 이상 하천의 공간적 관계를 나타내었다.

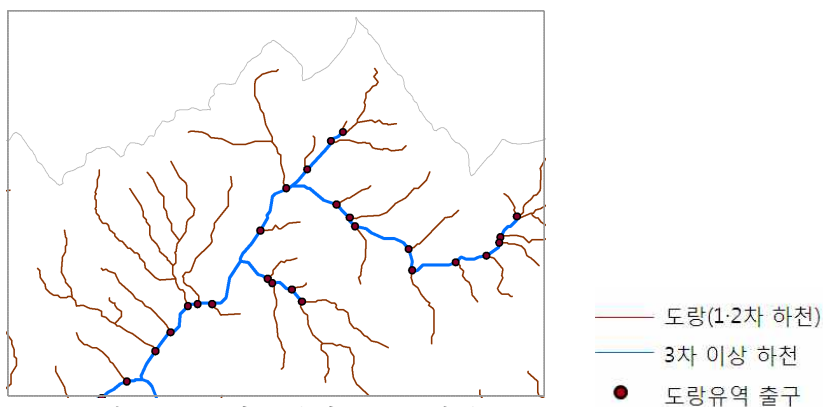


그림 21. 도랑유역의 출구 선정

(5) 도랑유역 추출

도랑유역의 출구와 흐름방향도를 입력 값으로 하여 도랑유역을 추출하였다. DEM을 바탕으로 추출된 도랑유역은 1,447 개이며 총 면적은 428.3 km²로 보청천 유역의 77.4%를 차지한다. 그러나 추출된 도랑유역에서 몇 가지 오류를 발견하였다. 논인 경우 물길이 지형에 따라 형성되기보다 농배수로에 의해 결정이 되며, 도시지역의 경우 하천이 복개된 구간이 존재한다. DEM을 통해 추출한 하천은 농배수로와 복개된 하천을 반영하지 않으며, 지형을 따라 형성되었지만 실제 하천을 바탕으로 제작된 수치지도에는 나타나지 않는 하천을 포함한다. 따라서 실제로 존재하지 않는 도랑을 제외하기 위하여 DEM을 통해 추출한 도랑유역 중 하천차수도의 1·2차 하천을 포함하지 않는 도랑유역은 제외하였다. 최종적으로 추출된 도랑유역은 1,148 개로 보청천 유역의 71.8%인 397.3 km²로 파악되었다(그림 22).

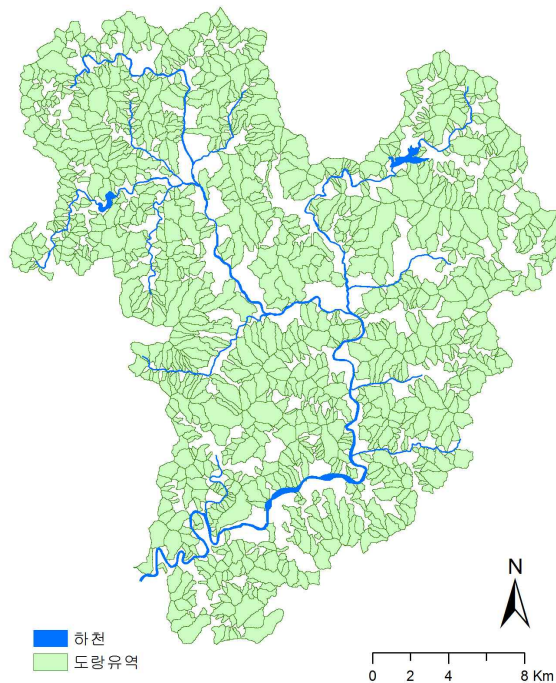


그림 22. 보청천 유역 내 도랑유역

3) 관리 대상 도랑유역의 선정

향후 유역 관리 기법을 적용할 관리 대상 도랑유역을 다음의 두 가지 요소를 고려하여 추출하였다. 첫째는 도랑이 물길의 형태로 실제 존재해야하고, 둘째는 주민의 참여 통한 도랑유역 관리가 이루어지기 위해서는 주거지에 인접하는 곳이어야 한다. 앞 장에서 실측데이터인 하천차수도와 비교를 통해 최종적으로 도랑유역을 추출함으로써 첫 번째 요소는 반영을 하였으며, 두 번째 요소를 반영하기 위해 도랑유역 중 주거지를 포함하는 유역을 추출하였다. 그 결과 관리 대상 도랑유역은 338 곳으로 보청천 유역의 29.9%인 165.3 km²로 파악되었다(그림 23).

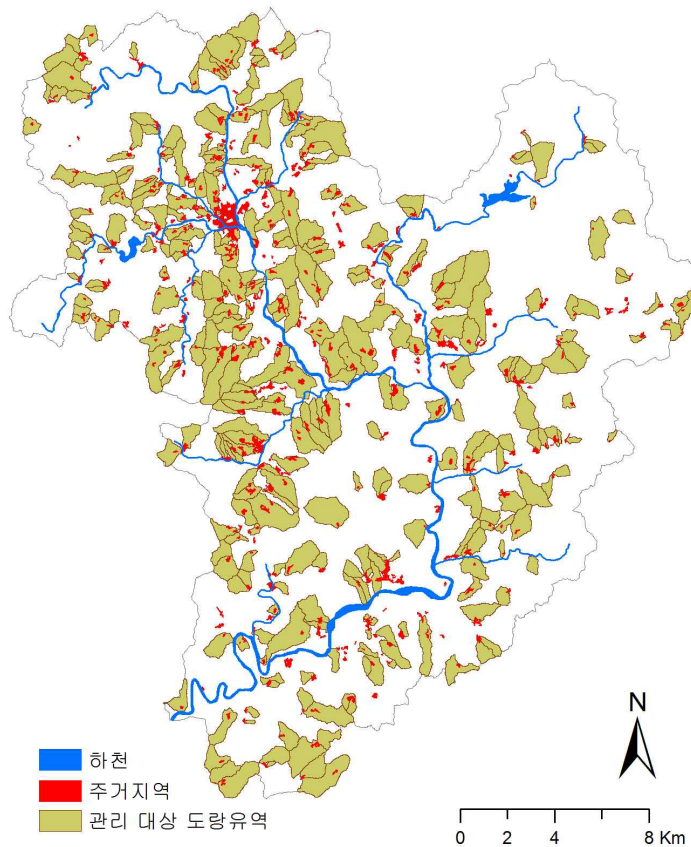


그림 23. 보청천 유역 내 관리 대상 도랑유역

3. 도랑유역의 분석

앞 절에서 추출한 도랑유역과 관리 대상 도랑유역의 면적, 도랑총길이, 수계밀도를 분석하였다.

도랑유역의 면적은 유역 형성의 임계값으로 지정한 0.05 km^2 부터 2.45 km^2 범위로 편차가 크게 나타났다. 이는 1차 하천이 바로 3차 이상의 하천으로 유입되는 경우에는 작은 도랑유역을 형성하며, 2차 하천 중 지류가 많은 경우 그 유역이 커지기 때문이다. 도랑유역의 평균 면적은 0.35 km^2 이며, 주거지를 포함하는 관리 대상 도랑유역의 평균 면적은 경우 이보다 넓은 0.48 km^2 이다(표 16). 유역 면적 별 분포를 살펴보면, 0.25 km^2 이하인 도랑유역이 전체 유역의 49.7%를 차지하며 1 km^2 이하인 도랑유역이 약 90%를 차지한다. 작은 규모의 도랑유역들은 주거지를 포함하지 않기 때문에 관리 대상 도랑유역의 경우 전체 도랑유역과 비교하여 0.25 km^2 이하인 유역의 비율은 낮으나 유역 면적이 1 km^2 이하인 도랑유역이 전체의 80%로 대부분을 차지하는 등의 분포 양상은 전체 도랑유역과 비슷하다(표 17).

유역 내 도랑총길이는 최소 80 m, 최대 8.39 km이고, 평균 1.27 km으로 파악되었다. 또한 관리 대상 도랑유역의 도랑총길이는 최소 130m부터 최대 8.13 km이고, 평균 1.78 km이다(표 16). 소하천의 지정기준이 시점에서 종점까지 500 m 이상인 것을 고려할 때 평균 도랑총길이가 긴데 그 원인은 물길의 발원지점에서부터의 길이이며 또한 유역 내 여러 지류의 길이를 합산한 값이기 때문이다. 관리 대상 도랑유역의 도랑총길이 분포는 전체 도랑유역의 분포와 비슷하며 2 km 이하가 대부분이이고 그 이상의 길이는 점차 적은 빈도를 차지한다(표 18).

수계밀도는 유역 내에서 하계망의 조밀한 정도를 나타내는 수치로서 하천 총연장을 유역 면적으로 나눈 값이다. 토양이나 암석의 투수율이 낮으면 강우가 침투하지 못하고 지표로 흐르게 되므로 고밀도 하계가 발달한다. 즉 수계밀도가 클수록 강우가 단시간에 지표로 유출되는 것을

의미하므로 홍수관리에 주의해야 한다. 도랑유역의 수계밀도는 0.34에서 49.52의 범위이며 평균 4.21이고, 관리 대상 도랑유역의 경우 평균 4.16이다(표 16). 대부분의 도랑유역은 2 이상 6 미만의 수계밀도를 나타내며, 소수의 도랑유역의 수계밀도가 10이 넘는 것으로 파악되었다(표 19).

표 16. 도랑유역의 면적, 도랑총길이, 수계밀도 분석

	전체 도랑유역			관리 대상 도랑유역		
	area(km ²)	length(km)	L/A	area(km ²)	length(km)	L/A
Min.	0.05	0.08	0.34	0.05	0.13	0.93
Max.	2.45	8.39	49.52	2.45	8.13	35.96
Avg.	0.35	1.27	4.21	0.48	1.78	4.16

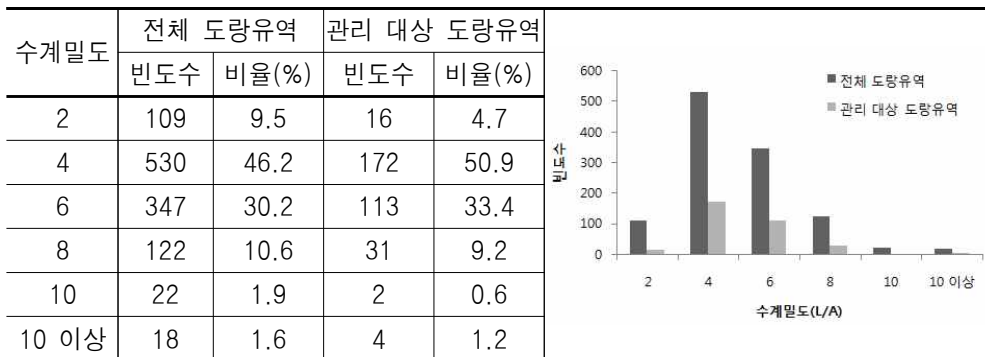
표 17. 도랑유역 면적

유역면적 (km ²)	전체 도랑유역		관리 대상 도랑유역		
	개수	비율(%)	개수	비율(%)	
0.25	571	49.7	110	32.5	
0.5	338	29.4	115	34.0	
0.75	123	10.7	45	13.3	
1	64	5.6	33	9.8	
1.25	25	2.2	15	4.4	
1.25 이상	27	2.4	20	5.9	

표 18. 도랑총길이

총길이 (km)	전체 도랑유역		관리 대상 도랑유역		
	빈도수	비율(%)	빈도수	비율(%)	
1	634	55.2	119	35.2	
2	296	25.8	107	31.7	
3	124	10.8	52	15.4	
4	54	4.7	35	10.4	
5	25	2.2	15	4.4	
5 이상	15	1.3	10	3.0	

표 19. 도랑유역 수계밀도



V 유역모델의 적용

유역모델은 관리 효과를 장기적으로 정량화 하여 평가할 수 있으며 (Santhi C et al., 2006), 유역 내 오염물질이 발생하는 지역과 이동을 파악하여 장소에 맞는 적합한 관리 방안을 찾도록 돕는 강력한 시각적 수단이 된다(Gaddis EJB et al., 2010). 본 연구에서는 도랑유역에 특정 관리가 행해졌을 때 여러 도랑유역을 포함하는 중규모 유역의 수질 개선 정도를 파악하기 위하여 유역모델을 이용하였다.

1. 유역모델의 선정

1) 유역모델의 검토

본 연구의 목적과 공간 규모에 적합한 모델을 선정하기 위해 유역 모델을 검토하였다.

유역모델은 유역 분할 구조에 따라 총괄형(lumped), 준분포형(semi-distributed), 분포형(distributed)으로 분류된다. 총괄형 모델은 유역 내 수문단위나 오염원 등의 공간분포를 고려하지 않는 경우이며, 준

분포형 모델은 대상 유역을 소유역으로 분할하거나 소유역을 더 세분하여 수문반응단위(Hydrologic Response Units, HRUs) 또는 그와 유사한 단위로 구분하는 구조로 공간적 특성을 고려하여 전체적인 수문현상을 해석할 수 있다. 분포형 모델은 대상 유역을 일정 크기의 격자로 구분하고 각 격자로부터 수문현상을 계산하는 방식으로 유역 내부의 공간적 특성과 그 배치를 모두 고려하여 수문현상을 상세하게 해석할 수 있다.

현상 표현 수식에 따라서는 경험식(Empirical), 개념식(Conceptual), 물리식 (Physically-Based)에 의한 모델로 분류된다. 유역 모델에서 많이 이용 경험식으로는 수문현상 모의에 있어서는 미국 자연자원보존국(Natural Resource Conservation Service, NRCS)에서 개발한 유출곡선지수방법(runoff curve number method, CN)과 토양유실을 예측하는 범용토양유실공식(Universal Soil Loss Equation, USLE)이 있다. CN(Curve Number) 방법은 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있으나 강우유출 이외의 수문현상을 설명할 수 없는 단점이 있으며, USLE 역시 쉽게 사용할 수 있는 장점이 있지만 경험식 내에 사용되는 매개변수가 미국 내 실험결과에 의한 값으로 다른 지역에 적용할 경우 주의가 따른다. 이러한 이유로 유럽의 토양물리학자들을 중심으로 물리식에 기초하여 유사이동을 모의하기 위한 모델이 제시되어 그 이용이 확대되어가고 있다(2011, 농촌진흥청).

유역규모에서 널리 사용되는 모델로는 Annualized Agricultural NonPoint Source Model(AnnAGNPS), Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation(ANSWER), Soil Water Assessment Tool(SWAT), Hydrological Simulation Program-Fortran(HSPF)등이 있다. AnnAGNPS는 AGNPS를 연간 일강수량에 대하여 적용 가능하도록 구성한 것으로 유역을 동일한 성질로 간주한다. 경험식을 이용하여 수문과 유사를 모의하며, 온도에 대한 고려가 없고, 탄소, 질소, 인에 대한 모의가 가능하다. SWAT은 유역을 수문반응단위와 소유역으로 구분하며 역시 경험식을 이용하여 수문과 유사를 모의한다. 질소와 인을 모의하며 코드를 이용할 수 있는 장점이 있다.

HSPF는 유역을 투수지역과 불투수지역으로 나누어 모의하며, 수문은 개념적으로 유사한 물리식에 기초하여 모의한다. ANSWER는 정방형 그리드로 유역을 분할하는 분포형 모델로 수문과 유사한 물리식에 기반하여 모의한다. 그러나 온도에 대한 고려가 없고 탄소를 모의할 수 없으며, 소스코드가 개방되어있지 않다(Borah D · Bera M, 2003). 영국 Macaulay 연구소에서 개발된 CAMEL(Chemicals from Agricultural management and Erosion Losses)은 정방형 그리드로 유역을 분할하는 분포형 모델로 물리식을 기반으로 하며, 온도를 고려하고 탄소, 질소, 인의 변환과정과 유역 내 거동을 모의할 수 있다. 또한 우리나라 농촌지역의 주요 토지이용중 하나인 논에서의 수문, 수질 현상을 모의할 수 있다(Koo et al., 2005)(표 20).

본 연구에서 정의한 도랑유역의 최소 규모는 5 ha로 매우 작은 유역으로 이를 반영하기 위해서는 격자를 기반으로 하는 분포형 모델이 적합하다. 특히 대상지가 농촌지역으로 논에서의 수문, 수질모의가 중요하기 때문에 이를 모의할 수 있는 CAMEL을 이용 모델로 선정하였다.

표 20. 주요 유역 모델의 특성 비교

Criteria	AnnAGNPS	SWAT	HSPF	ANSWERS –Continuous	CAMEL
Watershed representation	Homogeneous land areas, reaches and impoundments	Sub-basins with HRUs	Pervious and impervious areas (land segments)	Square grids (uniform characteristics)	Square grids (uniform characteristics)
Temporal scale	Daily or sub-daily	Daily	1 min. to 1 day	Daily and 30 seconds	1 min. to 1day
Water	Conceptual (SCS CN and TR55 method)	Conceptual (SCS CN method)	Conceptual	Physically-based	
Sediment transport	Empirical (RUSLE) and physically-based	Empirical (MUSLE)	Physically-based		
Temperature	X	O	O	X	O
C	O	X	X	X	O
N	O	O	O	O	O
P	O	O	O	O	O
Source code availability	X	O	O	X	O

2) CAMEL 모델 개요⁶⁾

(1) 개요

본 연구에서 이용한 CAMEL(Chemicals, Agricultural Management and Erosion Losses)은 분포형 유역모델로 중소 규모의 유역에 대하여 장기간 동안의 지표수 및 지하수 유동을 통한 물과 오염물질의 변환과 이동을 모의하고 물질수지 및 에너지수지를 분석할 수 있다. 주요 특징은 다음과 같다.

- 대상 유역을 임의 크기의 정방형 격자로 분할하고 각 격자에서의 물질수지를 최소 1분에서 최대 1시간까지의 시간간격으로 계산한다.
- 지표수의 유동은 정상류(steady flow)로 해석한다.
- 논밭의 두께와 하천제방의 높이에 따라 지표수의 흐름을 제어할 수 있다.
- 지표수 유동에 의한 토양에서의 유사(clay, silt, fine sand, coarse sand) 이동과 불투수지표면에서의 입자성 오염물질의 축적-유출 과정을 모의한다.
- 토양/지표수/지하수 중의 탄소, 질소, 인의 변환과정과 이동을 모의한다.
- 각종 농업 비점오염의 저감방안을 모의한다.

(2) 입출력자료

CAMEL의 입력 자료는 공간자료, 기상자료, 매개변수로 구성된다. 공간자료는 지형자료, 토지이용도, 토양도를 필요로 하며, 지형자료는 지표면 고도, 경사도, 흐름방향도, 흐름누적도가 필요하다. 기상자료는 강수량, 기온, 상대습도, 풍속, 대기압, 일사량이 입력된다. 또한 식생, 토양,

6) Koo B et al.(2005)와 농촌진흥청(2011)을 바탕으로 정리하였다.

하천에 대한 자세한 정보는 매개변수를 통해 입력된다. 식생은 토지이용별로 대표 식생을 정하고 그 식생의 높이, 뿌리 깊이, 식생계수, 계절별 엽면적지수(leaf area index), 뿌리에 의한 토양점착력, 수관의 강우차단 저류량, 식생잔재물(residue) 유입량, 화학비료와 퇴비 시비량 등의 정보를 입력한다. 토양은 토양도별로 토양층의 깊이와 토양 함수량(saturation, field capacity, wilting point, residual water content), 포화수리전도도, 토양입도 구성비, 표토의 점착도(cohesivity) 및 유실도(detachability), 대공극(macropore) 주변의 상호작용 토양 비율 등의 정보를 필요로 한다. 하천은 소유역을 연결하는 주요 하천별로 하천의 폭과, 하상깊이, 하도 조도계수, 수리시설 제원 등을 입력하며, 소유역 내의 하천에 대해서도 하천의 규모와 토지이용에 따른 조도계수를 입력한다. 관개와 관련하여 농업용 관정의 위치와 관개시기, 관개량 등의 자료를 입력하며, 유역 전체에 대해 동일한 지질층을 가정하고 대수층 깊이, 대수층 함수량(saturation, field capacity, residual water content), 포화수리전도도 등의 자료를 입력한다(표 21).

표 21. CAMEL의 주요 입력자료

구 분	속 성
기 상	강수량, 기온, 이슬점 온도, 상대습도, 풍속, 대기압, 운량, 일사량
지 형	고도, 경사도, 유향(flow direction), 누적유향(flow accumulation)
토 양	토양층 깊이, 토양함수량(saturation, field capacity, wilting point, residual water content), 포화수리전도도, 토양입도 구성비, 표토의 점착도(cohesivity) 및 유실도(detachability), 대공극(macropore) 주변의 상호작용 토양 비율 등
지 질	대수층 깊이, 대수층 함수량(saturation, field capacity, residual water content), 포화수리전도도 등
토지이용	토지이용 분류
식 생	수관의 강우차단 저류량, 지표면 저항계수, 식생의 높이, 뿌리 깊이, 식생계수, 엽면적지수(leaf area index), 뿌리에 의한 토양점착력 증가, 식생 잔재물 유입량 등
하 천	하폭 및 하상 깊이, 하도 저항계수, 수리시설 제원 등
관 개	농업용 관정 및 개별 관정의 위치 및 관개시기, 관개량 등
시 비	농경지에 사용한 화학비료 및 퇴액비의 사용 시기와 사용량

CAMEL의 주요 출력 자료는 시계열 자료(Time series data), 스냅샷 자료(Snapshot data), 물질수지 자료(Mass balance data)이다. 사용자가 지정하는 지점에서 특정 매개변수 값의 시간적 변동을 시계열 형식으로 출력할 수 있으며, 특정 시간에 특정 매개변수의 값을 유역 내 공간분포 지도의 형태로 출력할 수 있다. 또한 전체 유역에 대한 물질수지 관련 매개변수 값의 시간적 변동을 시계열 형식으로 출력할 수 있다.

(3) 구성 요소

CAMEL은 지표수(surface flow), 중간류(interflow), 지하수 유출(Groundwater discharge) 등의 수문 과정과 지표수 유동에 의한 유사의 이동, 토양·지표수·지하수 중의 탄소, 질소, 인의 변환과 이동을 모의한다.

수문과정을 모의하기 위해 수관, 토양, 대수층, 하천 등 4개의 저장소를 이용하며, 각 수문과정은 셀마다 계산되어 소유역 단위로 합산되고 소유역 말단의 노드(node)에 저장된다. 노드와 노드는 링크(link)로 연결되며 이에 대한 유출을 모의하기 위한 하도추적(channel routing)에는 Muskingum-Cunge법을 이용한다. 링크에서의 평균유속은 매닝방정식(manning equation)에 의해 산정되며, 이때 조도계수는 하천의 특성을 고려하여 각 링크별로 지정한다.

유사의 이동을 모의하기 위해 육상(intertill), 세류(rill), 하천(channel) 등 3개의 유사 저장소를 정의하며, 유사는 입도에 따라 점토(유효입경 $1\ \mu\text{m}$), 미사(유효입경 $10\ \mu\text{m}$), 세립사(유효입경 $100\ \mu\text{m}$) 및 조립사(유효입경 $1000\ \mu\text{m}$)로 구분된다. 또한 유사는 물에 떠서 이동하는 부유사와 바닥에 깔리거나 튀면서 이동하는 소류사로 구분되며, 환경부에서 관측하는 부유물질은 부유사에 해당한다.

CAMEL의 탄소, 질소, 인의 이동과정은 유사 흡착 입자상 영양물질과 용존상 영양물질로 구분하여 모의한다. 유사 흡착 입자상 영양물질은 유사의 입도에 따라 탄소, 질소, 인의 흡착능력이 달라지므로 그에 따른

이동량을 계산하고, 용존상 영양물질의 이동은 개념적 전달함수를 이용하여 산정한다. 강우유출수에 의한 입자상 영양물질의 이동은 토양의 표층 1 cm 이내에 존재하는 입자상 영양물질을 대상으로 하며, 용존상 영양물질은 강우유출수, 중간류 및 대수층 충전류에 의해 이동된다. (그림 24).

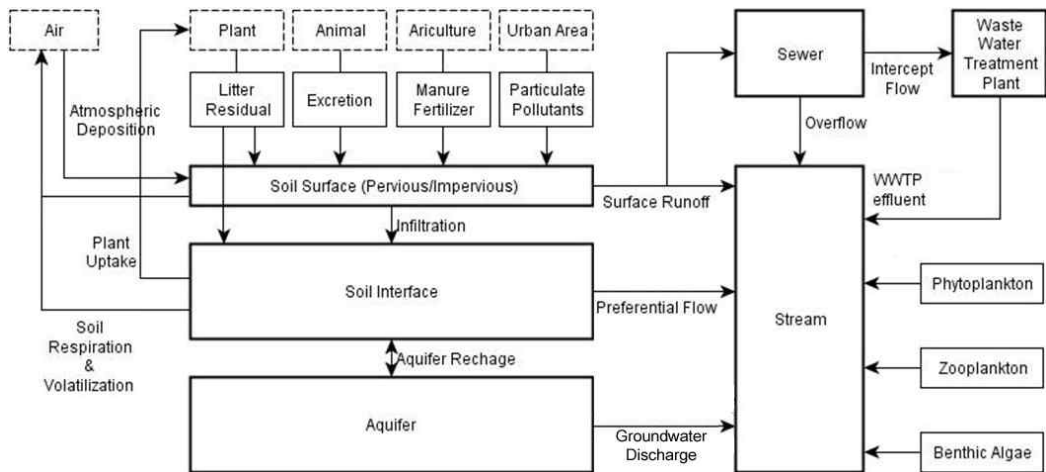


그림 24. 탄소, 질소, 인의 이동(농촌진흥청, 2011)

2. 입력자료 수집과 분석

보청천 유역 중 총량측정망에 의한 수질자료를 수집하는 보청천3 수질관측지점을 출구로 하여 대상 유역을 제한하였고, 그에 대한 지형, 토양, 토지이용, 기상 등의 입력자료를 구축하였다.

1) 지형자료

국토지리정보원에서 제작한 10m DEM을 100m 해상도로 변환하고 대상지역의 DEM을 추출하였다. 추출한 DEM을 바탕으로 경사도, 흐름방향도, 흐름누적도 등을 추출하였다(그림 25~ 그림 27). 대상지역의 고

도는 115m에서 908m에 걸쳐 있으며, 최대 경사도는 41.7 도로 대체로 동쪽지역의 경사가 높고, 보청천 본류가 흐르는 유역의 중심부분은 평탄하다. 흐름누적도의 최솟값은 41687로 마지막 셀에 모든 상류유역의 흐름이 누적된 것을 확인할 수 있다.

소유역(subcatchment)의 출구를 연결하는 하천의 특성을 부여하기 위해 대상유역을 소유역으로 분할하였다(그림 28). 소유역을 분할하는 원칙으로 관측데이터가 위치한 지점, 하천이 합류되는 지점, 하천과 범람원의 특성, 댐과 같은 지형구조물 등을 고려하였다(Hummel PR et al., 2003). 분할된 소유역 21개 개로 평균 면적은 19.9 km²이고, 가장 작은 소유역의 면적은 7.25 km², 가장 큰 소유역의 면적은 33.5 km²이다.

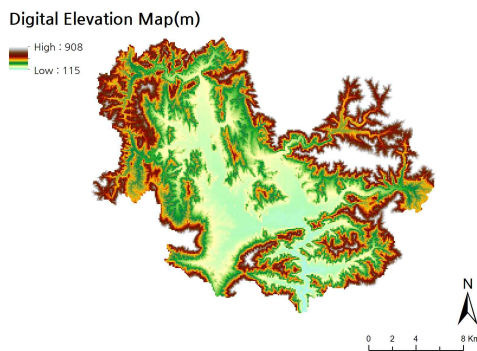


그림 25. 표고(DEM)

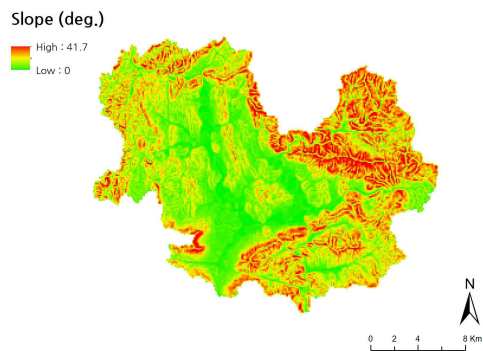


그림 26. 지표경사도

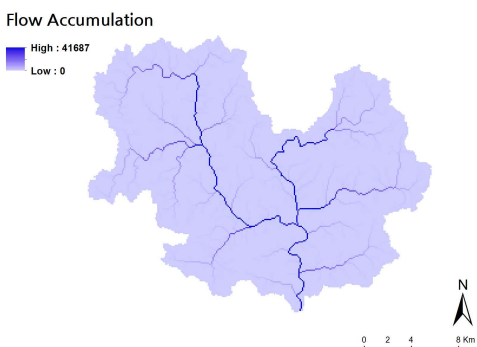


그림 27. 흐름누적도

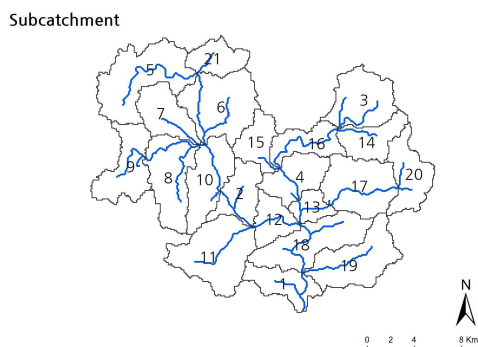


그림 28. 소유역도

2) 토양도, 토지피복도

토양도는 국립농업과학원에서 제공하는 1:250,000 축척의 개략토양도를 이용하여 구축하였다(그림 29). 유역의 평탄한 지역은 식양질 내지 사양질의 Ma 토양통이며, 북서쪽 구룡산 지역은 Mm, 북동쪽 속리산 지역은 Mv가 널리 분포한다(표 22). 토양특성별로 살펴보면 식양질 내지 사양질이 전체의 65%로 가장 넓은 면적을 차지하며, 다음으로 식양질이 약 18%를 차지한다.

토지피복도는 2009년 환경부에서 제작한 30 m 해상도의 중분류 토지피복도를 이용하였다(그림 30). 대상 유역의 토지이용은 산림이 66.6%, 농경지가 27.2%로 대부분을 차지하고 있으며, 시가지는 약 3%를 차지한다(표 23).

표 22. 토양통별 특성과 면적 (이환주·김환기, 2001, 재인용)

토양통	특성	면적(km ²)	비율(%)
Af	충적토, 배수 불량 내지 양호, 미사사양질 내지 사양질	30.4	7.3%
An	회색토 및 충적토, 배수 양호 내지 약간 불량, 식양질	40.2	9.7%
Ap	회색토, 충적토 및 적황색토, 배수 불량 내지 양호, 미사식양질 및 식양질	17.3	4.2%
Ma	암쇄토 및 적황색토, 산성암, 배수 매우 양호, 식양질 내지 사양질	135.3	32.5%
Mm	암쇄토, 변성퇴적암 및 편암, 배수 매우 양호, 식양질 내지 사양질	85.6	20.6%
Mv	암쇄토, 중성 내지 염기성암, 배수 매우 양호, 식양질 내지 사양질	43.9	10.5%
Ra	적황색토, 암쇄토, 회색토 및 퇴적토, 배수 양호 및 약간 불량, 식양질	32.7	7.9%
Re	암쇄토, 회색토 및 충적토, 배수 양호 내지 불량, 사양질	7.3	1.8%
Rocky	암석노출지	23.6	5.7%

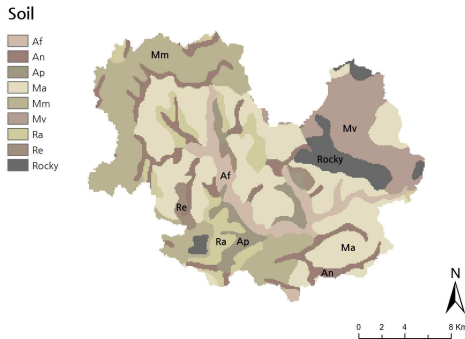


그림 29. 토양도

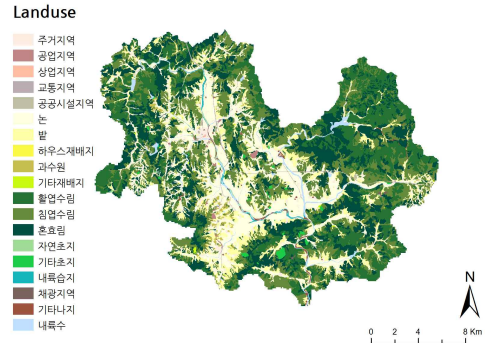


그림 30. 토지이용도

표 23. 토지이용별 면적과 비율

대분류	중분류	면적(km2)	비율(%)	비율(%)
시가화/건조 지역	주거지역	8.40	2.02%	3.09%
	공업지역	0.80	0.19%	
	상업지역	0.10	0.02%	
	교통지역	2.82	0.68%	
	공공시설지역	0.76	0.18%	
농업지역	논	70.85	17.00%	27.19%
	밭	38.84	9.32%	
	하우스재배지	0.02	0.00%	
	과수원	2.95	0.71%	
	기타 재배지	0.66	0.16%	
산림지역	활엽수림	90.10	21.62%	66.61%
	침엽수림	100.33	24.07%	
	혼효림	87.16	20.91%	
초지	자연초지	0.85	0.20%	0.66%
	기타 초지	1.88	0.45%	
습지	내륙습지	1.15	0.28%	0.00%
나지	채광지역	0.22	0.05%	0.48%
	기타 나지	1.78	0.43%	
수역	내륙수	7.10	1.70%	0.00%

3) 기상자료

강우자료는 국가수자원관리정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 11

곳(관기, 능원, 동정, 보은(수자원공사 관리), 삼가, 삼산, 송죽, 신탐, 안내, 이원, 청산)의 강우관측소에서 2009년 1월 1일부터 2011년 12월 31일까지 관측된 자료를 수집하여 분석하였다. 유역 내에 기상청에서 관리하는 보은강우관측소가 한 곳 더 있으나 시자료와 일자료에 의한 연간 강우량이 일치하지 않아 데이터의 정확성이 의심되며 1.6 km의 거리에 삼산강우관측소가 가까이 위치하는 것을 감안하여 배제하였다.

각 강우관측소의 강우특성은 다음과 같다. 강우관측소별 총 강우량의 경우 삼가관측소가 3년간 4,375 mm로 가장 높게 관측되었으며, 신탐관측소가 3년간 3,427 mm로 가장 낮게 관측되었다. 연간 강우량의 추이를 살펴보면 2009년이 가장 가뭄 해였고 2011년에는 집중호우가 쏟아지며 상당히 높은 강우량을 기록하였다. 2010년의 연 강우량은 2009년의 연 강우량 보다 대체로 높지만 일 최대강우량은 대체로 낮다(표 24, 그림 32).

강우 관측 자료를 모델에 이용하기 위해서는 관측 지점의 영향을 받는 지역을 파악해야하는데 이를 위해서 Thiessen망을 이용하였다(그림 31). 안내관측소와 청산관측소의 경우 대상지의 외부에 있으나 Thiessen망을 적용할 때 대상지역에 영향을 미치므로 그 데이터를 포함하였다.

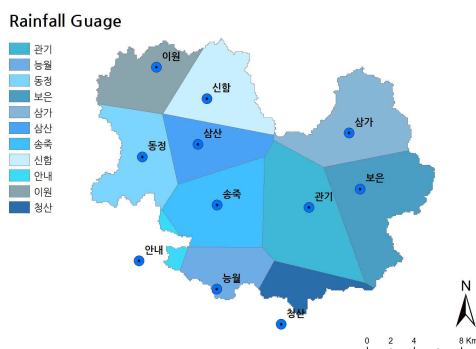


그림 31. 보청천 유역의 우량계 티센망

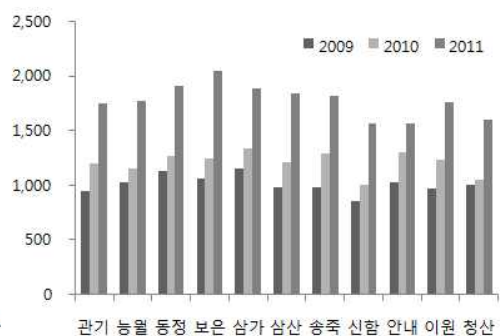


그림 32. 보청천 유역 인근의 연평균 강우량(2009-2011)

표 24. 3년간 년 강우량과 일평균 최고 강우량

Guage Name	EL. (m)	Guage Type	Total Rainfall (mm)	2009		2010		2011	
				Rainfall (mm)	max. rainfall (mm/day)	Rainfall (mm)	max. rainfall (mm/day)	Rainfall (mm)	max. rainfall (mm/day)
관기	160	보통	3,891	952	96	1,195	55	1,744	185
능월	180	T/M	3,956	1,030	102	1,153	55	1,773	191
동정	210	T/M	4,304	1,127	85	1,271	68	1,906	196
보은	200	T/M	4,351	1,063	101	1,245	68	2,043	223
삼가	380	보통	4,375	1,149	95	1,338	61	1,888	201
삼산	143	보통	4,031	987	77	1,206	68	1,838	203
송죽	130	T/M	4,092	987	88	1,293	78	1,812	202
신함	168	T/M	3,427	853	74	1,008	65	1,566	165
안내	88	T/M	3,896	1,031	95	1,301	81	1,564	183
이원	220	T/M	3,963	969	77	1,232	85	1,762	158
청산	120	T/M	3,642	1,000	131	1,049	59	1,593	167

보은기상관측소는 무인관측지점으로 일사량과 운량 정보를 제공하지 않는다. 따라서 일사량은 유역에서 가장 가까운 청주기상대의 자료를 이용하였고, 기온, 상대습도, 현지기압, 풍속, 등 4개의 기상자료는 유역 내에 위치한 보은기상대의 자료를 이용하였다. 기상자료도 2009년부터 2011년까지 3년간 한 시간 간격으로 자료를 분석하였다.

기온을 비롯한 모든 기상자료는 유역의 계절적 특성을 잘 반영하고 있다. 기온은 2011년 1월 16일에 최저 -20.1 °C, 2010년 8월 15일에 최고 33.5 °C를 보이며, 상대습도는 최저 8%에서 최고 98%를 보인다. 기압은 00.1 kPa에서 103.93 kPa의 범위이며, 풍속은 최대 9 m/sec이다. 최대 일사량은 3.88 MJ/m²이다(그림 33).

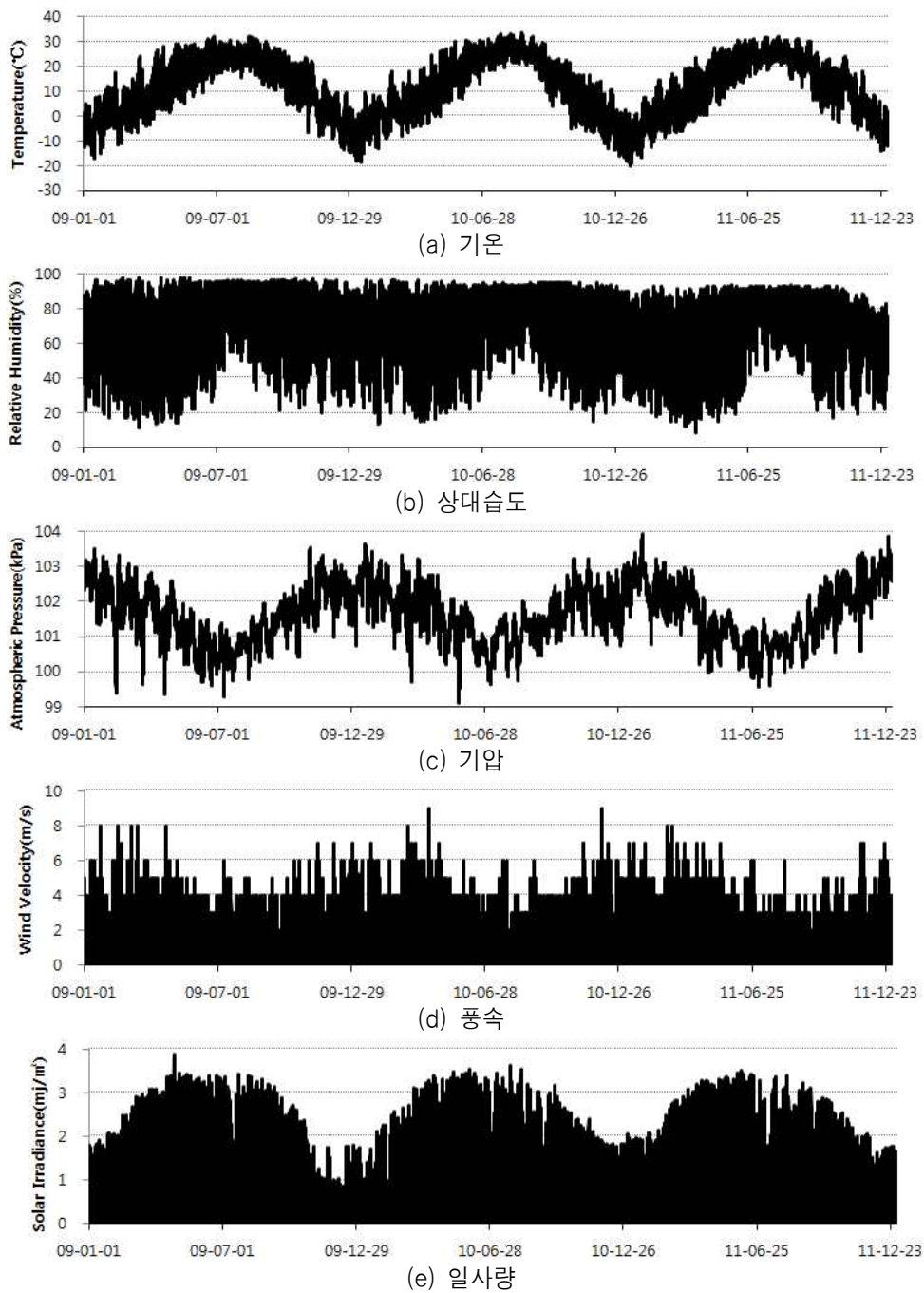


그림 33. 보청천 유역의 시간별 기상(2009-2011)

3. 유역모델 구축

모델의 입력 자료를 바탕으로 모델을 구축하였다. 유역을 분할하는 격자는 100x100 m로 하였으며, 입출력 시간단위는 한 시간으로 하였다. 앞장에서 추출한 관리 대상 도랑유역에 시나리오를 적용하기 위해 토지이용 중 논, 밭, 과수원, 기타경작지, 나지를 관리 대상 도랑유역에 위치하는 것과 아닌 것으로 구분하였다. 대상 유역 내 보은읍의 경우 공공하수처리구역인구보급률이 86.84%로 하수도가 상당면적 설치되어 있으나, 하수관망자료를 구하기 어렵고 그 면적이 37 km²으로 대상유역의 8.9%로 비중이 크지 않으므로 유역 전체에서 자연배수를 하는 것으로 가정하였다. 유역 내 수문순환의 초기 조건을 파악하기 위해 2009년 강우자료를 이용하여 모델을 반복 구동하였다. 모의 시작일과 마지막일의 토양함수량과, 활성대수층, 중간류, 표면유출의 변화가 거의 없는 안정화된 상태를 도출하였으며, 그 때의 토양함수량과 하천의 유량을 2010년의 초기 조건으로 입력하였다.

CAMEL은 유출 해석을 위한 기본단위인 수문응답단위(Hydrological Response Unit, HRU)를 결정하는데 토지이용, 토양, 강우관측소, 기상관측소, 경사도, 관거 유무를 고려한다. 대상 유역은 토지이용도 23 유형, 토양도 5 유형, 강우관측소 11 곳, 기상대 1 곳, 경사도 5 급간, 관거는 모두 없음으로 총 1,438 가지 수문응답단위 조합이 만들어졌다.

CAMEL에서는 토지이용별로 주요 식생 및 작물을 지정한다. 식생의 높이와 뿌리의 깊이, 입면적지수, 생산활동 시기 등에 따라 강우차단량, 증발산 등 수문에 영향을 미치며, 경작지의 경우 재배품종에 따라 표준 시비량이 다르기 때문이다. 모의 유역의 대부분(73.3%)을 차지하는 충청북도 보은군의 2011년 통계자료를 보면(보은군청 홈페이지), 밭작물을 경우 고추의 재배면적이 512.8 ha로 가장 넓었고, 다음으로 콩의 재배면적이 430 ha, 배추의 재배면적이 79.6 ha이다. 따라서 모든 밭에는 고추가 재배되는 것으로 가정하였다. 과수의 경우 사과의 재배면적이 522.8 ha, 감의 재배면적이 163.3 ha, 배의 재배면적이 67.5 ha로 사과의 재배면적

이 다른 과일의 재배면적보다 월등히 넓다. 따라서 모든 과수원에서 사과가 재배되는 것으로 가정하였다.

주요 작물별 시비량은 농촌진흥청의 주요작목영농순기표(농촌진흥청, 1995)를 참고로 표준 값을 적용하였다. 논·밭의 경우 3월 초순 1 ha 당 12,000 kg의 퇴비를 주며, 5월 초·중순경 밀거름, 6월 새끼칠거름, 7월 중하순 이삭거름을 한다. 총 질소비료 시비량은 1 ha 당 120 kg으로 밀거름으로 50%, 새끼칠거름으로 20%, 이삭거름으로 30%를 나누어 뿌린다. 총 인산비료의 시비량은 1 ha 당 80 kg으로 밀거름으로 한 번에 뿌린다.

고추는 2월 중순 파종 전에 1 ha 당 15,000 kg의 퇴비를 주며, 5월말에 1회 웃거름, 7월초에 2회 웃거름, 8월 중으로 3회 웃거름을 한다. 총 질소비료 시비량은 1 ha 당 103 kg으로 세 번의 웃거름에 동일하게 나누어 뿌린다. 총 인산비료의 시비량은 1 ha 당 91 kg으로 질소비료와 동일하게 세 번의 웃거름에 동일하게 나누어 뿌린다.

과수원에는 과실을 모두 수확한 후 12월 초경에 밀거름을 하며 적과 시기인 6월 초에 웃거름을 한다. 토양유기물 진단과 사과나무의 수령에 따라 퇴비 사용량이 결정되는데 범위의 중간 값인 토양 중 유기물함량이 16~25 g/kg이고 과실수 수령이 10~14 년인 것으로 가정하였다. 이에 대한 퇴비량은 1 ha 당 15,000 kg이고, 시비량은 1 ha 당 질소비료 65 kg, 인산비료 35 kg으로 밀거름과 웃거름 시기에 동일하게 나누어 뿌린다(농촌진흥청 원클릭 농업기술 홈페이지).

4. 보정과 검정

모델이 구역의 특성을 반영하여 실제 현상을 적합하게 재현할 수 있는지 파악하기 위하여 2010년 유량과 수질자료를 이용하여 모델을 보정하였으며, 2011년 자료를 이용하여 모델을 검정하였다. 매개변수의 보정 방법으로는 시행착오법을 이용하였다.

모델의 정확성을 평가하는 방법으로는 통계적 방법과 효율지수, 그

래프를 이용한 방법 등이 있다. 통계적 방법 중 가장 흔히 사용되는 것은 결정계수(coefficient of determination, R²)로 0~1의 값을 가지며, 1에 가까울수록 오류가 적은 것을 의미한다. 수문모델링에서 일반적으로 0.5 보다 크면 유의미한 상관관계가 있다고 간주된다(Moriasi D et al., 2007, 재인용). 그러나 결정계수는 극단값에 지나치게 민감하고 관측치와 모의치의 비례하는 차이나 부가적인 값에 대해서는 둔감하다(Moriasi D et al., 2007). 모델의 효율지수로 가장 많이 이용되는 것은 Nash-Sutcliffe 지수(Nash-Sutcliffe efficiency, NSE)로 잔차분산(residual variance)의 상대적인 정도를 표준화한 값이다. NSE는 관측치와 모의치가 1:1 선에 얼마나 잘 맞는가를 나타내며 수식으로 표현하면 수식 1과 같다. NSE는 $-\infty$ 부터 1사이의 값을 가지며, 1이 가장 최적값이다. NSE가 0과 1사이의 값을 가질 때 모델의 수행능력이 인정되며, 0 이하의 값은 인정되지 않는다. PBIAS(Percent bias)는 모의값의 평균적인 경향을 측정하는데 최적값은 0으로 그 값이 0에 가까울수록 정확함을 의미한다. PBIAS가 양의 값이면 모의값이 관측값보다 과소측정된 것이고, PBIAS가 음의 값이면 모의값이 관측값보다 과대측정된 것을 의미한다. 여기에서 PBIAS는 비율로 표현되는 모의값의 편차를 의미하는데 수식으로 나타내면 수식 2와 같다. Moriasi D et al.(2007)은 여러 수문, 수질 모델링을 다룬 논문을 검토하여 NSE와 PBIAS 값에 따른 모델 수행능력의 평가 기준을 제시하였는데, 이를 표 25에 정리하였다. 월단위 모의에서 NSE는 0.5 이상이면 만족 수준으로 평가되며, PBIAS는 유량의 경우 ± 25 사이의 값이면 만족 수준으로 평가된다.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \quad \text{수식 1}$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \quad \text{수식 2}$$

두 식에서 Y_i^{obs} 는 i번째 관측값, Y_i^{sim} 은 i번째 모의값, Y^{mean} 은 관측값의 평균, n은 관측값의 개수를 말한다.

표 25. 월간 유량에 대한 모델의 성능 평가 기준 (Moriassi D et al., 2007)

Performance Rating	NSE	PBIAS(%)		
		Streamflow	Sediment	N,P
Very good	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$	$PBIAS < \pm 15$	$PBIAS < \pm 25$
Good	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 30$	$\pm 25 \leq PBIAS < \pm 40$
Satisfactory	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$\pm 30 \leq PBIAS < \pm 55$	$\pm 40 \leq PBIAS < \pm 70$
Unsatisfactory	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$	$PBIAS \geq \pm 55$	$PBIAS \geq \pm 70$

본 논문에서는 유량에 대해 R^2 , NSE, PBIAS와 그래프 비교 방법을 이용하여 보검정 결과를 평가하였으며, 부유물질과 COD, T-N, T-P의 수질 항목에 대해서는 그래프 비교 방법을 이용하여 보검정 결과를 평가하고 R^2 를 참고로 제시하였다.

1) 유량

대상유역의 출구지점에서는 실시간 수위관측이 이루어지지 않으므로 그보다 약 7 km 상류에 위치한 기대교에서의 수위자료를 이용하여 유량에 대한 보정과 검정을 하였다. 금강홍수통제소는 10분단위로 기대교의 수위를 관측하며 수위-유량 곡선식을 이용하여 유량으로 변환한 자료를 제공한다. 10분 단위의 관측값을 1시간 평균으로 계산하여 1시간 단위로 출력한 모의값과 비교하였으며, 보정에는 2010년 관측자료, 검정에는 2011년 관측 자료를 이용하였다.

유량에 대한 보정 및 검정 결과는 관측값과 모의값은 매우 만족하는 수준의 상관성을 갖는 것으로 평가되었다. 보정 기간과 검정 기간의 관측값과 모의값을 그림 34과 그림 35의 그래프에 나타냈으며, 강우에 대한 수문 반응이 최솟값을 제외하고 비슷한 것을 확인할 수 있다. 2010년

과 2011년 모두 결측 기간은 보검정에서 제외하였으며, 시단위에서 모델 보정에 대한 평가 결과는 NSE 0.629, PBIAS -14.812, R^2 0.635로 계산되었고, 시단위 모델 검정에 대한 평가 결과는 NSE가 0.418, PBIAS -12.269, R^2 0.423로 계산되었다(그림 36과 그림 37). 이를 Moriasi D et al.(2007)이 제시한 기준을 참고로 월간 유량에 대한 모델 성능을 평가해보면 NSE 기준으로는 매우 만족(very good)하는 수준, PBIAS 기준으로는 만족(good)하는 수준으로 평가된다(표 26).

표 26. 유량에 대한 모델의 보검정 정확도 평가 결과

	시간 유량			월간 유량		
	R2	NSE	PBIAS	R2	NSE	PBIAS
Calibration	0.63	0.629	-14.812	0.94	0.924	-14.733
Validation	0.42	0.418	-12.269	0.99	0.957	-12.272

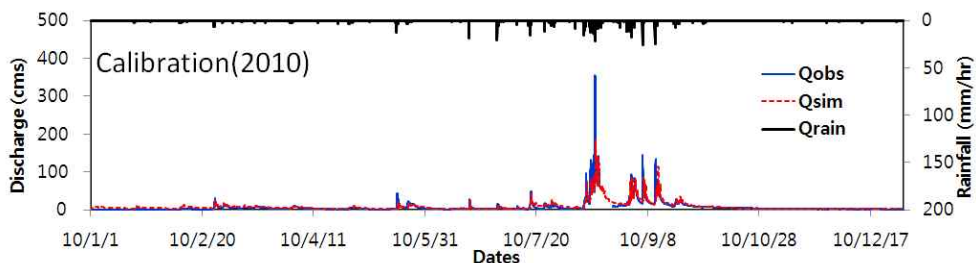


그림 34. 유량 보정 결과

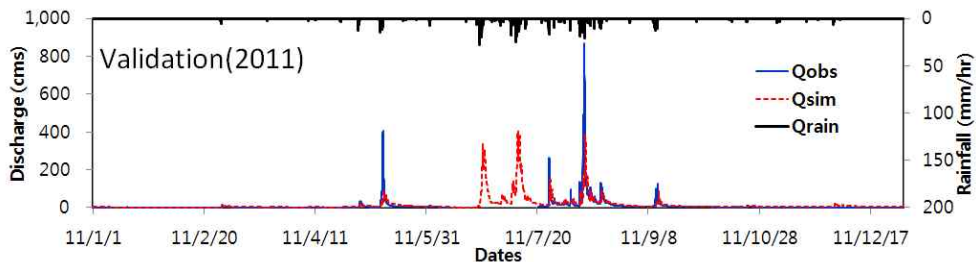


그림 35. 유량 검정 결과

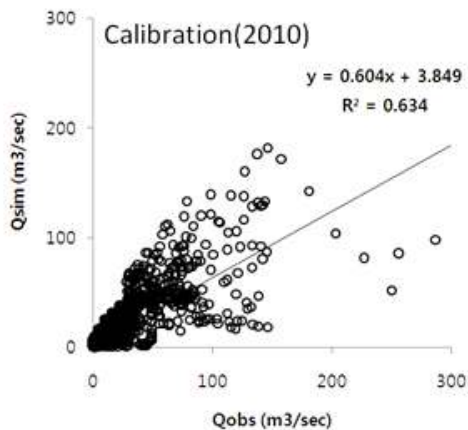


그림 36. 관측 유량과 모의 유량의 상관관계 (2010, 보정)

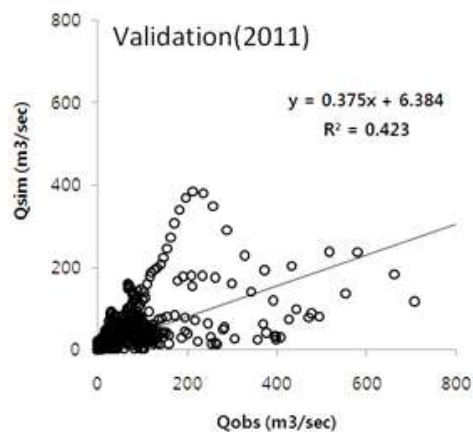


그림 37. 관측 유량과 모의 유량의 상관관계 (2011, 검정)

검정기간에서 시간 유량에 대해 상대적으로 NSE 지수가 낮게 나온 것은 관측값에 비하여 최고유량의 모의값이 월등히 낮게 추정되었기 때문으로 파악된다. 관측치 그래프에서 최고유량(866.8 m³/s)을 나타내는 2011년 8월 10일 6시를 기준으로 비가 오기 시작하는 2011년 8월 9일 8시부터 다음 비가 오기 전인 2011년 8월 16일 17시까지의 강우량과 관측치의 유출량을 비교해본 결과, 관측지점을 기준으로 한 유역에 내린 총 강우량은 65,722,373 m³이고, 총유출량은 76,832,574 m³로 유출량이 강우량보다 많은 117%가 된다. 같은 기간 동안 모의한 유출량은 57,048,110 m³로 강우량의 86.8%이다. 따라서 강우량과 유출량의 비를 고려할 때, 모의한 유출량이 더 합리적인 값으로 판단된다. 관측 유량이 강우량보다 많아진 오류는 측정된 수위에 대해 수위-유량 곡선식을 이용하여 유량으로 계산되면서 나타난 오류로 추정된다.

2) 부유물질

환경부에서 관측하고 있는 부유물질(suspended solid, SS) 자료는 전체 유사량이 아닌 부유물질을 대상으로 하기 때문에 실제 유역에서 발생

하여 하천으로 유입되는 유사 관측 자료는 없는 실정이다(이은정, 2011, 재인용). CAMEL은 유사를 부유사(suspended load)와 소류사(bed load)로 나누어 모의하는데, 유사의 농도는 부유사에 의해 결정되므로, 부유물질의 관측 자료와 부유사의 농도를 동일한 것으로 간주하였다.

보검정에는 대상구역의 출구지점인 보청천3의 수질관측 자료를 이용하였으며, 보정에는 2010년의 관측 자료, 검정에는 2011년의 관측 자료를 이용하였다. 부유물질 농도의 보정과 검정에 대한 통계적 평가는 다음과 같은 이유로 한계를 가진다. 첫째 부유물질 관측이 대체로 비강우시에 수집되어 호우 사상에 대한 부유물질 농도의 관측 자료가 없다. 둘째 부유물질의 농도를 측정한 시간이 기록되지 않아 하루 중 임의의 시간인 오후 4시에 측정되었다고 가정하였으나 부유물질의 농도는 강우의 영향을 크게 받기 때문에 하루 중 비가 언제 왔느냐에 따라 그 농도가 확연히 다를 수 있다. 따라서 부유물질에 대한 보정은 비강우시기의 모의값과 관측값의 기저 농도를 맞추는 것과 강우에 따른 부유물질 모의값의 농도 변화를 기준으로 진행되었다.

부유물질 농도에 대한 보검정 그래프를 그림 38과 그림39에 나타내었다. 보정과 검정시기 모두 모의값이 관측값과 2~3 mg/L의 범위에서 비슷한 수준으로 기저 농도를 형성하며, 강우사상에 대해 최고 400 mg/L 안팎의 농도를 나타내고 있다. 김진호 등(2005)이 우리나라의 전형적인 소규모 농촌구역으로 충북 괴산군 괴산읍 능촌리 유역에 대하여 비점오염물질의 유출 특성을 파악한 연구에 따르면, 부유물질의 농도는 우기 평균 76.6 mg/L 건기 평균 3.5 mg/L이다. 따라서 보편적인 부유물질의 평균 농도와 2010년과 2011년의 강우량이 예년에 비하여 많았던 것을 고려하면 부유물질의 모의값은 합당한 수준으로 볼 수 있다.

부유물질의 농도를 측정한 시간을 알 수 없기 때문에 정확한 값이라고 할 수 없으나 관측값과 모의값의 상관관계를 보면 보정기간에는 결정계수 0.4487, 검정기간에는 결정계수 0.8079로 나타났다(그림 40과 그림 41). 2011년의 결정계수가 높게 나타난 이유는 관측값 중 8월 1일의 값이 강우 중에 관측되어 평시보다 월등히 높은 농도인 약 200 mg/L 기록

하였고, 이 값이 상관계수에 크게 작용하였기 때문이다. 그래프 상에서 확인하면 그 시기에 모의값의 농도도 약 300 mg/L까지 증가하였으나, 관측 시간의 기준으로 잡은 오후 4시의 농도는 약 40mg/L에 그쳐 추세선 기울기의 농도는 0.1987로 낮게 나타난 것으로 분석된다.

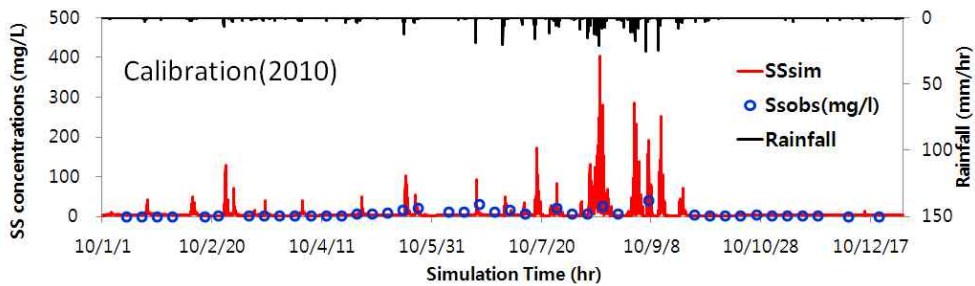


그림 38. 유사 보정 결과

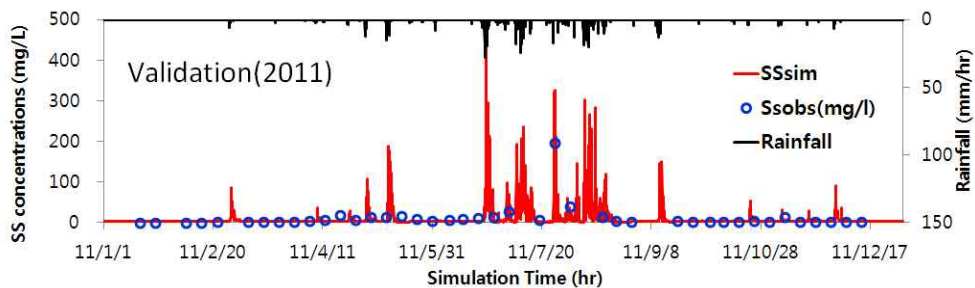


그림 39. 유사 검정 결과

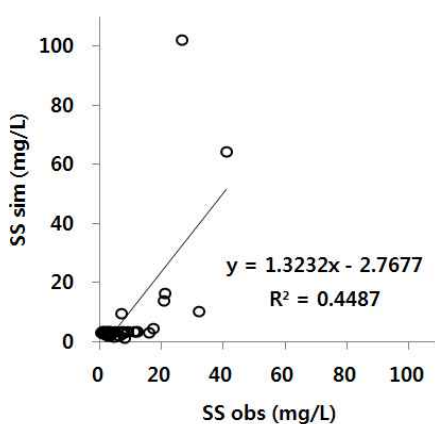


그림 40. 관측 유사량과 모의 유사량의 상관관계 (2010, 보정)

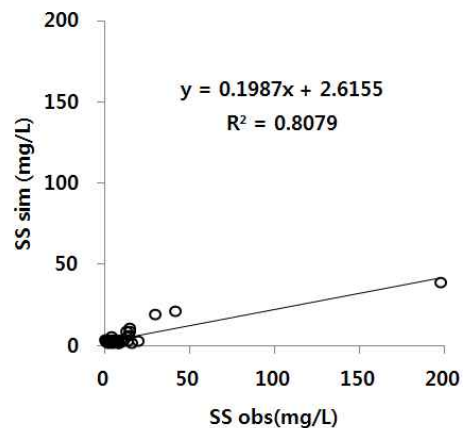


그림 41. 관측 유사량과 모의 유사량의 상관관계 (2011, 검정)

3) COD, T-N, T-P

부유물질과 마찬가지로 유역출구인 보청천3 수질관측지점에서 수집된 관측 자료를 이용하여 COD, T-N, T-P 보검정을 실시하였다. 보정은 2010년의 관측 자료를 이용하였으며, 검정은 2011년의 관측 자료를 이용하였다. COD, T-N, T-P의 관측자료도 유사와 마찬가지로 대체로 비강우시에 수집되어 최고치에 대한 기준이 없으므로 기저 농도를 비슷하게 맞추는 것, 각 항목별 강우사상에 대해 적절한 최솟값을 유지하는 것, COD, T-N, T-P간 상대적인 농도가 합당할 것을 기준으로 하여 보정을 실시하였다.

COD 보검정 그래프를 그림 42과 그림 43에 나타내었다. 보청천 유역의 COD 농도는 관측값과 모의값이 약 2 mg/L 수준에서 기저를 형성하고 있으며, 강우 시기에 농도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 참고로 관측값과 모의값의 결정계수는 보정기간 0.326, 검정기간 0.373으로 나타났다(그림 44과 그림 45).

T-N의 보검정 그래프를 그림 46과 그림 47에 나타내었다. 그래프를 통해 관측값과 모의값이 기저농도에 대해서는 어느 정도 일치하는 것을 확인할 수 있다. 참고 자료인 결정계수가 보정시기 0.0656, 검정시기 0.1108으로 다른 수질 항목에 비하여 상대적으로 낮게 나타났다(그림 48과 그림 49). 이것은 3장의 그림 12에 나타난 것처럼 T-N의 관측 농도의 특성이 유량과 상관성이 낮기 때문인 것으로 분석된다.

T-P의 보검정 그래프를 그림 50과 그림 51에 나타내었다. 관측값과 모의값의 기저농도는 0.01에서 0.02 mg/L 범위에서 형성되고 있으며, 강우시기에 농도가 급등하는 것을 확인할 수 있다. 참고자료인 결정계수가 보정기간이 0.859, 검정기간이 0.788으로 다른 수질 항목에 비하여 상관성이 매우 높게 분석되었다(그림 52, 그림 53). 이것은 3장의 그림 12에 나타난 것처럼 T-P 관측 농도의 특성이 유량과 농도 간에 강한 상관관계를 나타내기 때문으로 분석된다.

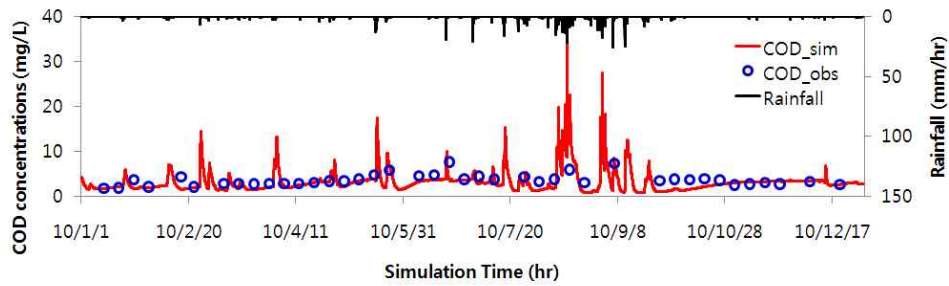


그림 42. COD 보정 결과

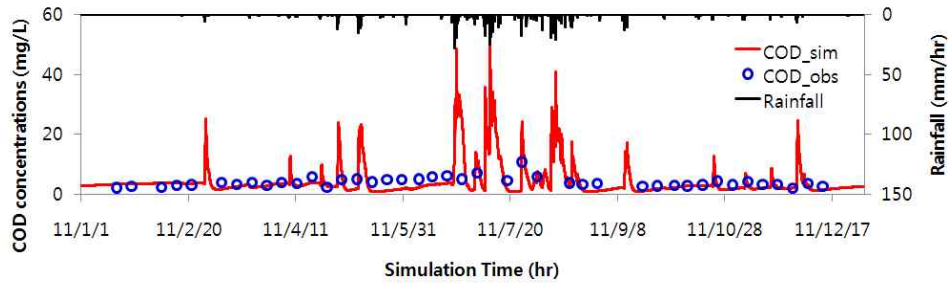


그림 43. COD 검정 결과

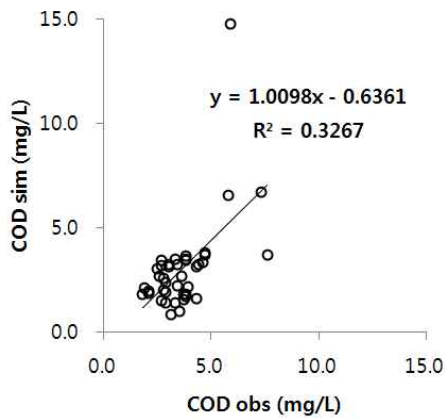


그림 44. COD의 관측 농도와 모의 농도의 상관관계 (2010, 보정)

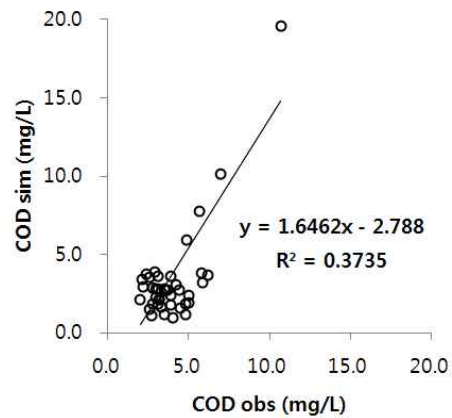


그림 45. COD의 관측 농도와 모의 농도의 상관관계 (2010, 보정)

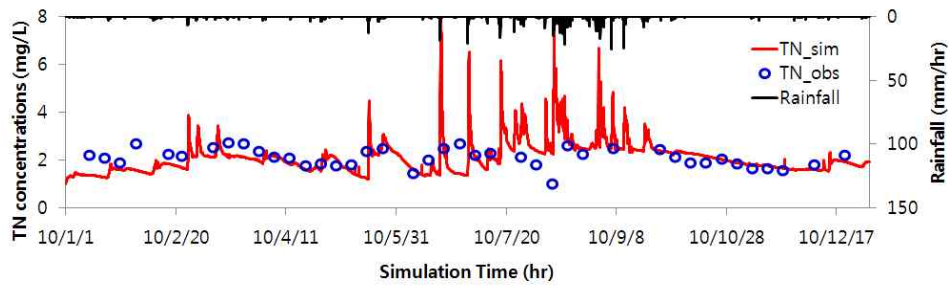


그림 46. T-N 보정 결과

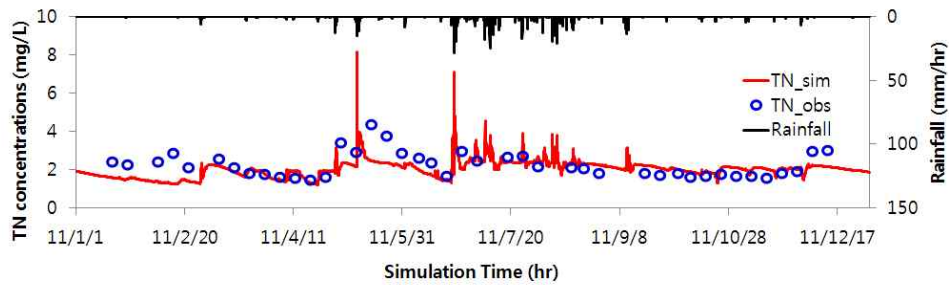


그림 47. T-N 검정 결과

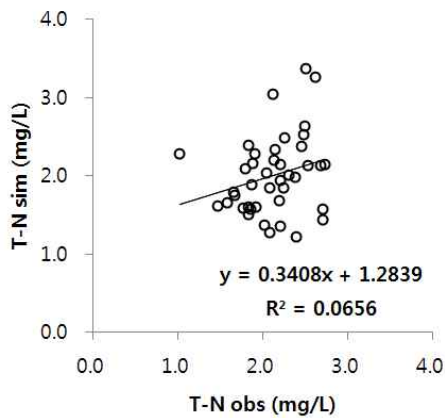


그림 48. T-N의 관측 농도와 모의 농도의 상관관계 (2010, 보정)

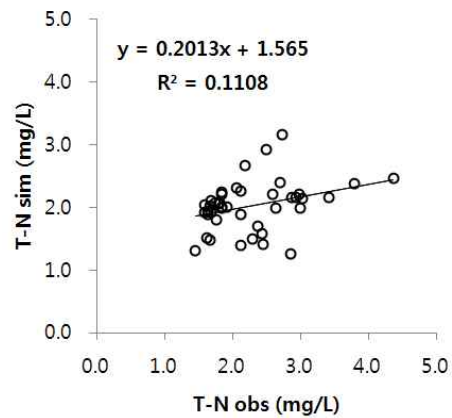


그림 49. T-N의 관측 농도와 모의 농도의 상관관계 (2011, 검정)

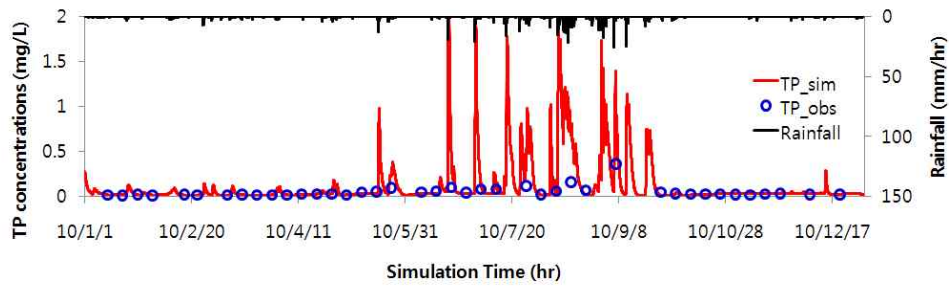


그림 50. T-P 보정 결과

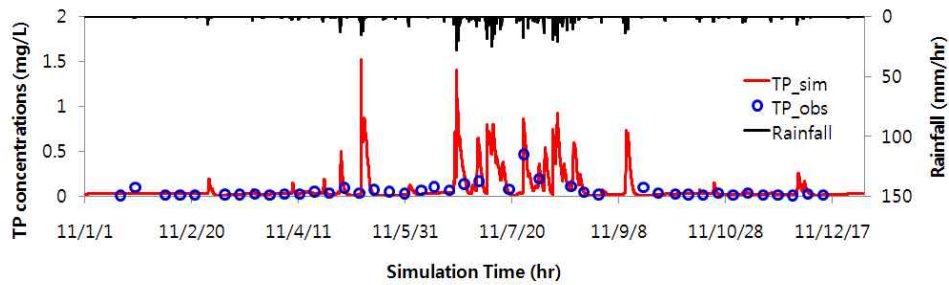


그림 51. T-P 검정 결과

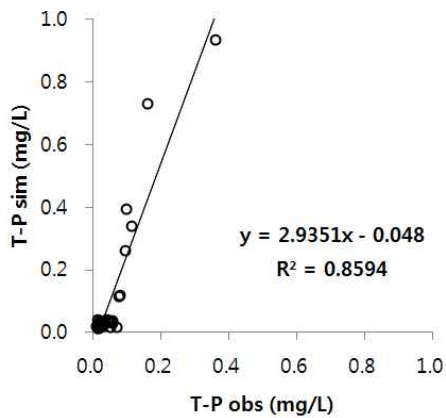


그림 52. T-P의 관측 농도와 모의 농도의 상관관계 (2010, 보정)

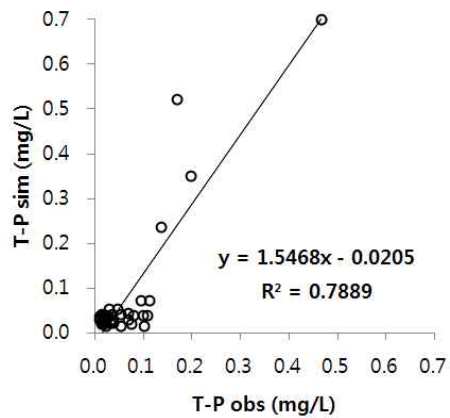


그림 53. T-P의 관측 농도와 모의 농도의 상관관계 (2011, 검정)

VI 도랑유역 관리 시나리오 분석

시나리오 분석은 시나리오 작성, 시나리오 구현, 시나리오 적용 결과와 분석으로 이루어진다. 선행연구에서 정리한 도랑유역 관리 방안과 현장 답사를 통해 확인한 도랑유역의 문제점을 고려하여 시나리오를 작성하고, 검정된 모델을 이용하여 그 효과를 분석하였다.

1. 시나리오 작성

현장답사에서 확인한 문제점과 주민들의 노력으로 실행할 수 있는 관리기법을 고려하여 다음의 6가지 시나리오를 작성하였다(표 28).

첫째는 영양물질 관리로 과하게 사용할 경우 수질에 오염원으로 작용하는 퇴비와 비료의 사용량을 줄이는 것이다. 농가에서 실제로 시비하는 양이 농촌진흥청에서 추천하는 시비 기준량보다 많다는 연구가 다수 있으며(호교순 등, 1994; 윤재탁 등, 1999; 이춘수 등, 2002), 보은군에서도 친환경농산물을 인증 받는 농가의 수가 2010년에 2009년보다 두 배가량 증가한 것을 고려할 때(보은군청 통계), 시비량을 줄이는 것은 가능할 것으로 판단된다. 따라서 관리대상 도랑유역 내에 있는 경작지인 논, 밭, 과수원, 기타경작지에 대하여 시비량을 50% 줄이는 시나리오를 작성하였다.

둘째로 도랑유역 내에서 소홀히 관리되고 있는 축산계의 오염물질 배출을 줄이는 것으로 이는 축산농가 교육과 축산폐기물 수거를 통해 실현할 수 있다. 2008년의 미처리 동리별 점오염원 발생부하량을 살펴보면 축산계에서 발생하는 부하량이 BOD 35.7%, T-N 31.1%, T-P 38.7%으로 상당부분을 차지한다. 관리대상 도랑유역에 대하여 축산계의 발생부하량을 제외하면 기존 발생부하량보다 BOD의 경우 10.7%, T-N은 9.3%, T-P는 11.6% 감소한다(표 27).

표 27. 2008년 점오염원 발생부하량과 시나리오 적용 후 발생부하량

구분	BOD		T-N		T-P	
	발생부하량 (kg/day)	감소율 (%)	발생부하량 (kg/day)	감소율 (%)	발생부하량 (kg/day)	감소율 (%)
현 부하량	4,592.2		2,959.1		277.2	
축산계 발생 제외	4,100.9	10.7%	2,683.0	9.3%	245.1	11.6%

셋째로 경작지 주변에 발둑을 조성하는 것으로 강우 시 토양 유실을 줄일 수 있으며, 유출 속도를 줄여 경작지 내에서 우수 침투량을 증가시키는 역할도 한다. 고랭지 경작지의 경우 토양유실을 줄이기 위해 돌쌓기나 게비온(gabion)과 같이 둑 시설을 설치하는 사례가 많지만 이는 비용이 많이 들기 때문에 지역주민이 자발적으로 실행하기에는 어려움이 있다. 그러나 흙둑을 쌓고 토양을 잘 보존하는 식물을 식재하는 방법은 적용하기 어렵지 않을 것이라 판단된다.

넷째로 밭의 표면에 멀칭을 하는 것으로 멀칭을 함으로써 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다. 토양의 수분을 보존하여 관개량을 줄일 수 있으며, 토양의 온도 변화를 완화시킨다. 또한 지표수 흐름에 의한 토양 침식을 줄이고, 공기 중으로 토립자가 비산(飛散)되는 것 또한 줄일 수 있다. 잡초가 자라는 것을 방지하며, 토양의 질을 향상시키는 데에도 기여한다(NRCS website). 짚과 같은 자연재료로 멀칭을 하는 경우 유기물이 분해되면서 영양물질을 공급하는 역할을 하며, 유역 내 농경지에서 쉽게 얻을 수 있다는 장점도 있다. 멀칭에 의한 토양유실 감소 뿐 아니라 경작지 생산량 증가와 같은 농가의 혜택을 입증한다면 주민들이 자발적으로 시행할 것이라 기대한다.

다섯째로 주로 산림 개간이나 하천변을 전용한 형태로 많이 이용되고 있는 기타경작지나 방치되고 있는 나지를 초지 등 자연식생지로 전환하는 것이다. 산림을 개간한 경작지는 경사가 급하여 토양 침식의 우려가 크고, 하천변 경작지는 공간 배치상 하천에 직접적인 영향을 미친다.

이용하지 않는 나지에 식생을 도입하는 것은 어렵지 않으나 특정지역에 경작을 제한하는 것은 주민들과의 합의 및 경작 제한에 따른 대책이 필요하다.

마지막으로 여섯 번째는 위의 다섯 가지 시나리오를 모두 적용하는 것으로 기타경작지와 나지를 초지로 전환하고, 관리 대상 도랑유역 내의 밭 주변으로 독을 조성하며, 경작지 표면 전체에는 멀칭을 한다. 관리 대상 도랑유역 내에 있는 논, 밭, 과수원의 시비량을 절반으로 줄이며, 축산계에서 발생하는 점오염원은 전량 회수되어 없다고 가정하는 것이다.

표 28. 관리 대상 도랑유역에 적용한 시나리오

시나리오	번호	내용
현재 조건	0	
영양물질 관리	1	도랑유역 내 논, 밭, 과수원의 시비량을 50% 줄임
점오염원 관리	2	미처리점오염원 중 축산계의 발생부하량을 100% 줄임
토양유실 관리	3	밭독을 조성
	4	밭의 표면에 볏짚을 이용한 멀칭
토지이용 변화	5	도랑유역 내 기타재배지와 나지를 초지로 전환
복합 적용	6	시나리오 1,2,3,4,5를 복합 적용

2. 모델에서 시나리오 구현

영양물질 관리와 미처리점오염원 발생량은 모델에 들어가는 입력 자료를 조정함으로써 쉽게 모의가 가능하다. 밭독은 경작지의 가장자리에 30 cm 높이로 조성하는 것으로 가정하였다. 멀칭을 구현하는 방법으로는 지표에 도달하는 강우의 운동에너지와 밭작물의 수관에서 떨어지는 강우의 운동에너지를 모두 높이 1cm의 수관에서 떨어지는 에너지로 가정하였다. 또한 멀칭한 지표면의 거칠기는 토양이 노출된 지면의 거칠기와 다르므로 이에 대한 조도계수를 베클다그라스가 식재된 초지 혹은 덤

불이 있는 숲의 조도계수의 값인 0.4를 적용하였다(EPA 2005).

시나리오가 적용되는 토지이용에 대해서는 관리 대상 도랑유역에 해당하는 지역과 그 외의 지역을 구분하여 고유 토지이용 번호를 부여함으로써 관리 대상 도랑유역 내의 토지이용에 대해서만 시나리오가 작동하도록 하였다. 관리 대상 도랑유역의 토지이용별 면적은 표 29와 같다. 관리 대상 도랑유역의 전체 면적은 전체 유역 면적의 29.7 %이지만 시나리오가 적용되지 않는 산림이 차지하는 비율이 높아 시나리오가 적용되는 토지이용의 총 면적은 10.27%이다. 관리 대상 도랑유역의 분포는 그림 54에서 확인할 수 있다.

표 29. 시나리오가 적용될 토지이용의 면적과 비율

토지이용	관리 대상 도랑유역 면적 (km ²)	동일 토지이용에 대한 비율 (%)	전체 유역 면적에 대한 비율 (%)
논	23.15	32.67	5.55
밭	17.48	45.01	4.19
과수원	1.76	59.66	0.42
기타 재배지	0.20	29.41	0.05
기타 나지	0.23	12.92	0.06

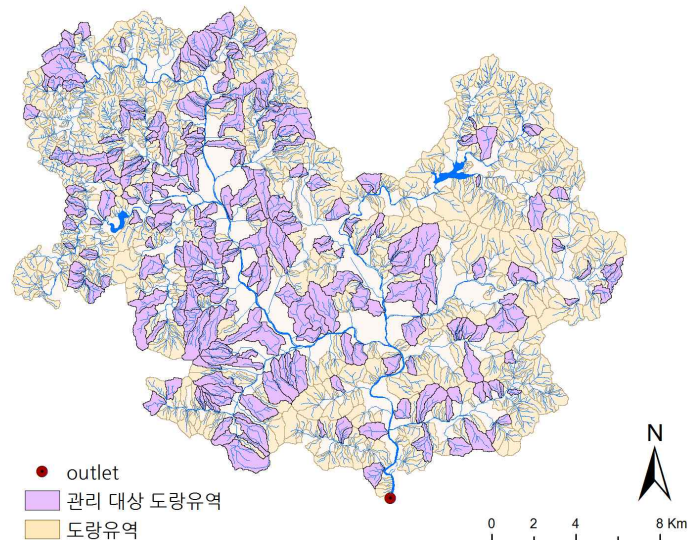


그림 54. 시나리오가 적용될 관리 대상 도랑유역의 분포

3. 시나리오 결과와 분석

오염부하량은 세 가지로 구분할 수 있는데 오염원으로부터 발생하는 오염물질 총량을 발생부하량이라 하고, 하수처리장과 같은 환경기초시설을 통하여 삭감된 후 배출되는 오염물질 총량을 배출부하량이라 한다. 또한 배출부하량이 지천을 통해 대상 수역까지 유입되는 과정에서 자정되어 다시 감소하는데, 이때 대상지점에 도달한 부하량을 유달부하량이라고 한다(송동하, 1999). 본 연구에서는 2010년에서 2011년까지 2년간 시나리오를 적용에 따른 수질개선 효과를 대상유역 말단의 유달부하량 감소를 기준으로 분석하였다.

시나리오 결과를 전체적으로 살펴보면, 영양물질 관리와 축산계 점오염원 관리는 토양 유실량을 감소시키지는 않으므로 유사량의 변화는 없고 영양물질의 유달부하량에만 영향을 미쳤다. 토양 유실과 관계되는 시나리오의 경우는 유사에 흡착되어 이동하는 영양물질이 있기 때문에 토양 유실 뿐 아니라 영양물질의 배출에도 영향을 미친다. 따라서 밭둑의 조성과 경작지 멀칭 시나리오 적용 결과는 유사와 영양물질의 유달부하량이 모두 감소하였다. 토지이용 변화의 경우 기타 경작지가 비경작지로 전환되면서 직접적인 시비량이 감소했으며, 나지에 식재를 함으로써 토양 유실도 감소하여 유사와 영양물질 유달부하량 모두 감소하였다.

개별 시나리오 적용에 따른 오염물질의 유달부하량 감소량과 그 비율을 표 30과 그림 63, 그림 64에 정리하였으며, 구체적인 내용은 다음과 같다.

퇴비와 비료의 시비량 감소 시나리오를 적용한 결과 대상 유역 말단에서 COD 유달부하량은 5.29%, T-N 유달부하량은 9.05%, T-P 유달부하량은 15.74% 감소하였다. 이 때 퇴비량 감소에 있어서는 COD, T-N, T-P의 부하량이 전부 영향을 받으나 질소비료와 인산비료의 사용량 감소에 있어서는 T-N과 T-P가 직접적으로 영향을 받기 때문에 T-P와 T-N의 감소가 크게 나타난다. 축산계의 미처리점오염원 발생을 제외하

는 점오염원 관리 시나리오를 적용한 결과는 COD 유달부하량 3.93%, T-N 유달부하량 3.46%, T-P 유달부하량은 2%로 각 수질 항목이 대체로 비슷한 비율로 감소하였다.

밭둑을 조성한 시나리오는 개별 시나리오 중 유사와 영양물질의 저감에 가장 효과적인 것으로 나타났다. 유사의 유달부하량이 4.7% 감소하였으며, COD, T-N, T-P의 유달부하량은 각각 23.08%, 9.79%, 27.82% 감소하였다. 경작지 지표면을 멀칭하는 시나리오를 적용한 결과는 유사 2.85%, COD 17.25%, T-N 0.71%, T-P 12.41%가 감소하는 것으로 예측되었다. 토양 유실 관리에 해당하는 밭둑과 경작지 멀칭 중에서 밭둑에 의한 유달부하량 감소가 크게 나타났는데 이것은 지표유출과 관계가 있다. 밭둑을 조성하는 경우 지표 유출이 2년간 평균 12.4% 감소한 반면, 멀칭을 한 경우 지표 유출이 0.4% 줄어드는데 그쳤다. 따라서 멀칭을 하는 경우 지표수의 속도는 감소하기 때문에 유사량과 COD, T-N, T-P의 배출량이 어느 정도 감소하지만 지표수 유출 자체를 제어하는 밭둑의 효과에는 미치지 못하는 것으로 분석된다.

토지이용 변화 시나리오는 유사, COD, T-N, T-P의 감소율이 각각 0.01%, 0.06%, 0.07%, 0.17%로 그 영향이 매우 적었다. 그 원인은 시나리오가 적용된 기타 재배지와 기타 나지의 총 면적이 0.43 km²로 전체 유역에서 차지하는 비율이 0.11%로 매우 낮기 때문이다. 또한 시나리오 적용에 있어 토지이용 변화는 초기 2년에 속한다. 즉, 기존 기타재배지와 나지가 저장하고 있던 유사와 영양물질이 초기의 토양에 존재하기 때문에 시나리오 결과에 따른 각 인자의 유달부하량 감소량이 과소 추정되었을 수 있다. Davenport TE et al.(2010)은 비점오염 관리에 의한 수질 개선 효과가 지체시간(lag time)으로 인해 기대수준을 충족하지 못하는 경우가 종종 발생하는 점을 지적하며, 문헌 검토를 통해 작은 유역에서 질소 시비량 관리에 의한 NO₃⁻ 농도의 반응시간은 약 4~10년, 수변림을 조성에 의한 NO₃⁻ 농도의 반응시간은 약 10년이 걸리는 등의 연구 사례를 제시하고 있다.

마지막으로 모든 시나리오를 복합 적용한 결과 유사량의 유달부하량

은 4.71%, COD, T-N, T-P의 유달부하량은 각각 26.22%, 13.96%, 33.24% 감소하였다. 복합 적용 시나리오 결과는 전체 수질 항목에 대하여 발독을 조성하는 것에서 지배적인 영향을 받으며, 시비량 관리에 의한 영양물질의 농도 감소 효과가 더해진 것으로 파악된다.

시나리오에 따른 수질 항목별 영향 영향을 분석하면, T-P의 유달부하량 감소가 T-N의 유달부하량 감소보다 점오염원을 제외한 모든 경우에 있어서 효과적으로 파악되었다. 이것은 질소의 경우 입자상의 형태보다 용존상의 형태로 배출되는 양이 많으며 따라서 지표수에 의한 유출의 비중보다 땅속으로 침투하여 배출되는 비중이 크다. 발독과 멀칭을 통해서 지표 유출은 제어할 수 있으나 토양으로 침투하는 양은 제어하기 어려우므로 T-N의 부하량을 감소시키기 위해서는 발생량 혹은 사용량 자체를 줄이는 노력이 필요할 것이다.

표 30. 시나리오 적용에 따른 2년간 Sediment, COD, T-N, T-P의 유달부하량 감소

시나리오	번호	Sediment		COD		T-N		T-P	
		유달 부하량 (kg/ha)	감소 비율 (%)	유달 부하량 (kg/ha)	감소 비율 (%)	유달 부하량 (kg/ha)	감소 비율 (%)	유달 부하량 (kg/ha)	감소 비율 (%)
현재 조건	0	748.33		207.36		50.66		11.08	
영양물질 관리	1	748.33	-	196.38	5.29	46.07	9.05	9.33	15.74
점오염원 관리	2	748.33	-	199.20	3.93	48.91	3.46	10.86	2.00
발독 조성	3	713.15	4.70	159.49	23.08	45.70	9.79	8.00	27.82
경작지 멀칭	4	727.03	2.85	171.59	17.25	50.30	0.71	9.70	12.41
토지이용 변화	5	748.24	0.01	207.24	0.06	50.62	0.07	11.06	0.17
복합 적용	6	713.11	4.71	152.98	26.22	43.59	13.96	7.40	33.24

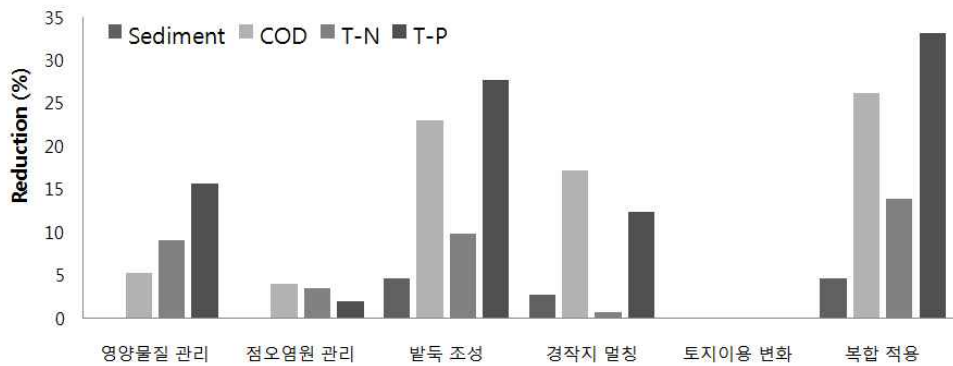


그림 55. 시나리오 적용에 따른 2년간 Sediment, COD, T-N, T-P 유달부하량 감소율

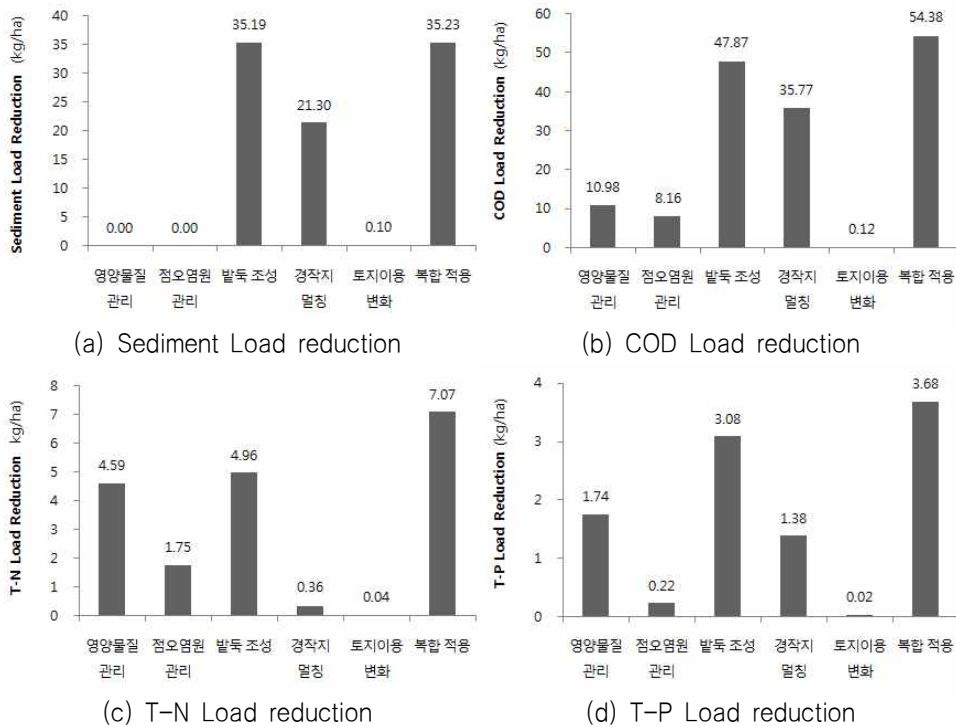


그림 56. 시나리오 적용에 따른 2년간 Sediment, COD, T-N, T-P 유달부하량 감소량

VII 고찰 및 결론

1. 고찰

1) 도랑유역의 관리 시나리오의 실제 적용 가능성

시나리오 분석을 통해 도랑유역의 관리가 중권역 유역 수질 개선에 효과적으로 기여하는 것을 확인하였으나, 각 시나리오가 현실에서 적용되기 위해서는 다음 사항에 대한 고민이 필요하다.

우선 유역 관리에 대한 주민들의 관심과 실천을 이끌어 내는 것이 무엇보다 중요하다. 미국 Vermont 대학에서 고안하여 메릴랜드주의 Solomons harbor 유역, 버몬트주의 ST. Albans 유역 등에 적용한 참여모델링기법(participatory modeling)의 경우 주민이 참여하여 유역의 문제점을 파악하고 관리 목표를 정하며, 모델링 결과를 연구자 집단과 주민들이 공유하고 모델을 함께 발전시키고, 주민에 의해 오염 저감 시나리오를 정하는 과정을 거친다(Gaddis EJB et al., 2010; Voinov A · Gaddis EJB, 2008; Gaddis EJB et al., 2007). 이러한 참여모델링기법의 장점은 주민들이 유역 내 문제점을 고민하고 그에 적합한 해결책을 시나리오로 제시하기 때문에 실현가능성과 비용효과에 대한 이해가 바탕이 된다는 점이다. 이번 연구에서는 주민들의 의견을 직접 파악하지 못하였으며 향후 주민들이 인식하는 문제점과 자발적으로 실천할 수 있는 대안, 외부의 도움이 필요한 대안 등에 대한 고려가 추가되어야 할 것이다.

또한 시나리오 중 퇴비, 시비량의 저감은 정확한 기준이 없을 경우 농업 생산량이 줄어듦 우려가 있으며 기타 경작지를 초지 전환하면 그만큼의 농산물을 경작할 수 없게 된다. 즉, 유역 관리에 있어서 환경적 목적과 경제적 목적을 조화롭게 달성하는 것은 쉽지 않은 문제이다. 이에 대한 해결책을 찾는 방안으로 환경적 인자와 경제적 인자에 대한 다기준 평가를 통한 절충안(Koo B와 O'Connell P, 2006), 비점오염 최적

관리기법 중 비용효율적인 관리 방안의 조합과 공간 분포 제시(이은정, 2011; Gitau M et al., 2004), 시나리오 이행에 필요한 비용에 대한 보조 등 정책적 지원 등을 고려할 수 있다.

2) 도랑유역 관리의 효율성

도랑유역을 유역 관리 단위로 할 때의 장점은 상명하달 방식이 아니라 유역 내 거주하는 주민들이 참여하여 스스로 인식하는 문제점에 대해 자발적으로 해결책을 찾을 수 있는 가능성이 크다는 점이며, 자발성은 곧 지속가능성 과도 연결된다. 또한 유역의 규모가 작기 때문에 이해관계가 상대적으로 단순하고, 유역 내 주민들은 서로 알고 지내는 사이이기 때문에 문제 해결에 있어 한 쪽이 일방적으로 희생하거나 이득을 취하지 않을 확률이 높다. 그러나 보청천 유역에서만 도랑유역 1,148 곳, 관리 대상 도랑유역 338 곳으로 다시 도랑유역 관리를 어떻게 총괄해야 하는 과제가 발생한다. 도랑유역 내에서 이해관계의 해결이 단순해지는 것과 대비적으로 서로 다른 도랑유역 간에 상충되는 이해가 발생할 가능성은 높아진다. ‘참여’, ‘지속가능성’을 중요시 여기는 통합수자원관리의 원칙을 고려할 때 도랑유역 관리의 필요성은 충분하다고 판단되나 그에 수반되는 반작용에 대한 고려도 필요하다.

도랑유역 관리에 의한 중권역 규모 유역의 수질 개선 효과에 대해서는 고무적인 결과를 얻었다. 인간에 의한 집약적인 토지이용이 도랑유역 내에서 주로 이루어지기 때문에 도랑유역을 관리하는 것은 공간적 범위는 좁혀 집중적인 관리를 행하는 것과 같다. 즉 관리 대상 도랑유역은 약 30% 이지만 그 내부에 전체 유역 과수원 면적의 60%와 전체 유역 밭 면적의 45%를 포함하고 있다. 그렇기 때문에 전체 유역 면적의 4.19%에 불과한 관리 대상 도랑유역의 밭에만 시나리오를 적용하여도 단순 면적 비 이상의 유달부하량 감소를 기대할 수 있다.

3) 모델 적용의 한계

모델을 적용하는 과정에서 최대한 상세하게 입력자료를 구축하려고 노력하였으나 이용할 수 있는 정보가 제한되어 대체되거나 누락된 것이 있었다. 기상자료 중 일사량은 보은기상관측소에서는 관측이 되지 않아 인근 청주기상대의 자료를 이용하였다. 보은군 보은읍의 경우 대체로 하수관거가 있지만 이를 반영하지 못하였으며, 유역 내 관정을 통해 취수되는 지하수 정보도 정확한 공간 정보가 없어 반영하지 못하였다. 또한 미처리점오염원의 경우 행정구역상 리 단위로 추정된 것으로 소유역별로 합산하여 소유역 말단에 합류되는 것으로 단순화하였다. 미처리 점오염원 중 축산계 부하량이 상당한 만큼은 축산 농가별 규모와 지리정보를 파악하여 모델에 입력하면 그 영향을 상세하게 파악할 수 있을 것이다.

모델의 보검정에 이용한 보청천 3 지점의 수질 항목 관측값이 대체로 비강우시에 측정되어 강우시에 증가한 수질오염 농도를 검정하지 못하는 문제가 있었다. 유량의 경우에는 2010년과 2011년 모두 결측치가 존재했으며, 수위-유량곡선식에 의해 유량이 계산될 때 강우량보다 유출량이 초과하여 산정되는 경우가 있었다. 모델의 신뢰도를 높이기 위해서는 관측데이터의 신뢰도가 바탕이 되어야 하며, 수질의 경우 더 촘촘한 시간 간격 혹은 강우시와 비강우시 모두에 대한 모니터링 자료가 필요하다.

2. 결론

도랑유역은 하천의 최상류 지점으로 도랑의 수질은 하류의 주요 하천에 까지 영향을 미치기 때문에 도랑유역을 관리하는 것은 수질관리에 중요하다. 본 연구에서는 분포형 유역모델인 CAMEL을 이용하여 도랑유역을 관리에 따른 중규모 유역 말단에서의 수질 개선 효과를 시나리오 분석 방법을 통해 확인하였다.

이를 위한 첫 단계로 먼저 도랑유역을 추출하였다. 정성적 개념의 도랑을 적합하게 구현하는 정량적 개념을 도출하기 위하여 하천체계에 따른 하천차수를 분석하였으며, 1:25,000 수치지도에 나타나는 1·2차 하천을 도랑으로 정의하였다. GIS 수문분석 기능을 이용하여 도랑유역을 추출한 결과, 보청천 유역에서 1,148 곳의 도랑유역이 추출되었으며 이는 전체 유역 면적의 71.8%를 차지한다. 또한 도랑유역 중 주민이 거주하여 유역 관리에 참여할 수 있는 유역은 338 곳으로 전체 유역 면적의 29.9%를 차지한다. 도랑유역의 평균 면적은 0.35 km^2 , 유역 내 평균도랑 연장 1.27 km 로 분석되었다.

주민이 거주하는 도랑유역에 대해 다섯 가지 유역 관리 시나리오를 작성하여 개별적인 효과를 파악하였으며, 모든 시나리오를 함께 적용할 때의 효과도 확인하였다. 모의한 수질 항목은 유사, COD, T-N, T-P이고, 유달부하량의 감소를 평가 기준으로 삼았다.

퇴비와 비료의 시비량을 50%로 줄이는 영양물질 관리 시나리오가 축산폐기물을 전량 수거하여 발생부하량을 전혀 없도록 하는 축산계 점오염원 관리 시나리오보다 모든 항목에서 더 효과적이었다. 토양유실을 방지하기 위한 방편으로 밭둑을 조성하는 것과 경작지를 멀칭하는 시나리오를 적용하였으며, 두 경우 모두 유사와 영양물질의 감소에 큰 효과가 있었다. 이 중 밭둑을 조성하는 시나리오 결과는 개별 시나리오 중 모든 수질 항목에 대해 가장 효과적인 관리 방안으로 나타났다. 기타 경작지와 나대지를 초지로 전환하는 토지이용 변화 시나리오는 유역에서 차지하는 면적이 작아 효과가 크지 않았다. 모든 시나리오를 함께 적용한 결과, 부유물질 4.71%, COD 26.22%, T-N 13.96%, T-P 33.23%의 유달부하량이 감소하였으며 이는 개별 시나리오에 의한 저감 효과의 산술적인 합 보다는 작은 수치이다. 그 원인은 멀칭과 밭둑 조성은 중복적인 관리방법으로 밭둑을 조성하는 경우 멀칭 효과는 상쇄되며, 시나리오 적용은 수문순환에도 영향을 미치므로 그 결과가 복합적인 것으로 분석된다.

지금까지 국내의 유역 관리 정책은 중권역 및 대권역 유역에 관심을

두고 있으며, 4대강으로 대변되는 큰 강을 중심으로 관리가 이루어져 왔다. 본 연구는 주민들의 참여가 활발히 이루어질 수 있는 유역의 규모로 도랑유역을 제안하고, 연구대상 유역인 보청천 유역 내에서 그 분포를 파악하였으며, 도랑유역의 관리를 통해서 실효성 있는 수질 개선 효과를 기대할 수 있음을 확인한 점에서 의의를 가진다. 본 연구에서는 보청천 유역 내 모든 도랑유역에 동일한 시나리오를 적용하였으나, 주민들이 참여하여 도랑유역의 문제점을 파악하고 그에 대한 관리 방안을 모색한다면 보다 현실적으로 실현 가능한 유역 관리가 행해질 수 있으며, 그에 상응하는 수질 개선 효과를 기대할 수 있을 것이다.

■ 참고문헌

- 건설교통부 (2006), 「국제수문개발계획(IHP) 연구보고서」.
- 국립환경과학원(2008), 「수계오염총량관리 기술지침」.
- 국토해양부(2010), 「비점오염원 최적관리지침」.
- (2011), 「4대강 살리기 사업에 따른 비점오염원 관리 방안 연구」.
- 금강유역환경청(2011), 「금강 유역 도랑 실태조사 및 복원 사례·모델 제시 연구」.
- 금강물환경연구소(2011), 「금강수계 도랑복원 표준모델 개발 및 사후관리 방안 연구」 1차년 보고서.
- 김경민(2007), "유역 관리를 위한 거버넌스", 「대한환경공학회지」, 29(11):1191-1203.
- 김정욱(2010), 「나는 반대한다」, 서울: 느린걸음.
- 김진호, 이종식, 류종수 등(2005), "영농기 농촌 소유역의 비점오염물질 유출 특성", 「한국환경농학회지」, 24(2):77-82.
- 농촌진흥청(1995), 「주요작목영농순기표」.
- 농촌진흥청(2011), 「가축분뇨의 농경지 시용에 따른 환경영향 종합평가를 위한 통합 유역모델 및 의사결정지원시스템의 개발」.
- 박성제, 박두호, 이재웅, 이진희(2003), "유역 관리의 이념적 변화와 새로운 인식 : 미국의 사례를 중심으로", 「한국수자원학회논문집」, 36(2): 78-86.
- 송동하(1999), 일일 오염부하량 예측을 위한 분포형 유역 모형 개발, 서울대학교 공학박사 학위논문.
- 송재석(2010), "우리나라 제도적 물레짐의 개혁적 진화", 「한국지방자치학회보」, 22(2): 5-27.
- 안형기(2009), "물관리정책의 진화과정과 4대강정비사업",

- 「한국정책과학학회보」, 13(4):143-170.
- 양인태, 김연준, 유영걸(2002), “DEM 격자크기에 따른 지형경사와 배수유역 면적의 분석”, 「한국측량학회지」, 20(3):303-311.
- 윤용남(2007), 「수문학 기초와 응용」, 경기도: 청문각.
- 윤재탁, 김창배, 김찬용, 박양호(1999), 「농가비료 이용 실태조사」, 경상북도 농업기술원.
- 이기완, 김영주, 윤광식(2005), “농촌 소유역 수환경 개선을 위한 유역 관리 협의체 구성방안”, 「농촌계획」, 11(4):59-65.
- 이도원 역음(2004), 「한국의 전통생태학」, 서울: 사이언스북스, 1장 생태학은 예 사람의 삶 안에 있었다.
- 이용곤(2011), 「경상남도 도랑살리기 현황과 과제」, 경남발전연구원.
- 이은정(2011), SWAT 모형과 무제약 조건 최적화를 이용한 유역 비점오염원 관리, 서울대학교 공학박사 학위논문.
- 이정규, 최병렬, 장홍준(2004), “DEM 격자크기에 따른 유역특성 및 유출응답변화”, 「2004 년도 대한토목학회 정기 학술대회」, 4043~4047.
- 이춘수, 이계준, 이정태, 신관용, 안재훈, 조현준 (2002) “고령지 배추 재배농가의 시비실태 조사연구”, 「한국토양비료학회지」, 35(5):306-313.
- 이환주, 김환기(2001), “GSIS 공간분석을 활용한 토양침식모형의 입력인자 추출에 관한 연구”, 「한국측량학회지」, 19(1):27-37.
- 장정익, 한인섭, 김경태, 나공태(2011), “시화호 유입하천의 수질오염물질 농도에 관한 연구”, 「한국측량학회지」, 33(4):289-299.
- 정인주, 이정민, 김상용, 이종출(2002), “DEM에 의한 지형인자 추출에 따른 격자크기의 영향에 관한 연구”, 「한국지형공간정보학회」, 10(2): 67-75.
- 최지용, 박언상(2008), 「다목적댐 상류 소유역 관리 방안 연구」, 한국환경정책평가연구원 정책보고서, 2008(04):1-117.

호교순, 박백균, 전태하, 김유학(1994), “주요 논 · 밭 작물에 대한
농가시비(農家施肥) 실태”, 「한국토양비료학회지」, 27(3):238-246.

환경부(2002), 「相生의 강으로 和合의 강으로 : 4대강 물관리대책
수립에서 특별법 제정까지」.

----- (2003a), 「유역 관리 시스템의 이해」.

----- (2003b), 「중소유역 수질보전대책 수립지침」.

----- (2006), 「물환경관리 기본계획」.

----- (2007), 「4대강 도랑 · 실개천 실태조사 사업」.

----- (2008), 「5대강 유역 도랑 실태조사·연구」.

----- (2009), 「4대강 유역 도랑 복원 및 관리 방안 연구」.

----- (2010), 「생태하천 복원사업 중장기 추진계획」.

----- (2011), 「수질측정망 운영계획」.

Borah D, Bera M(2003), "Watershed-scale hydrologic and
nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases",
Transactions of the ASAE, 46(6):1553-1566.

Childs C, Kabot G, Murad-al-shaikh M(2004), Working with ArcGIS
Spatial Analyst, ESRI.

Clements J, Creager C, Beach A, Butcher J, Marcus M, Schueler
T(1996), "Framework for a watershed management program",
Water Environment Research Foundation, Alexandria.

Congalton RG(1991), "A review of assessing the accuracy of
classifications of remotely sensed data", Remote sensing of
environment, 37(1):35-46.

Davenport TE, Dressing SA, Meals DW(2010), "Lag time in water
quality response to best management practices: A review", Journal
of Environmental Quality, 39(1):85-96.

- EPA(2005), Storm Water Management Model users manual.
- (2008), Handbook for developing watershed plans to restore and protect our water bodies.
- Gaddis EJB, Vladich H, Voinov A(2007), "Participatory modeling and the dilemma of diffuse nitrogen management in a residential watershed", *Environmental Modelling & Software*, 22(5):619–629.
- Gaddis EJB, Falk HH, Ginger C, Voinov A(2010), "Effectiveness of a participatory modeling effort to identify and advance community water resource goals in St. Albans, Vermont", *Environmental Modelling & Software*, 25(11):1428–1438.
- Gitau M, Veith TL, Gburek W(2004), "Farm-level optimization of BMP placement for cost-effective pollution reduction", *American Society of Agricultural Engineers*, 47(6):1923–1931.
- Hummel PR, Kittle JL, Duda PB, Patwardhan A(2003), "Calibration of a watershed model for Metropolitan Atlanta", *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2003(4):781–807.
- Koo B, Dunn S, Ferrier R(2005), "A distributed continuous simulation model to identify critical source areas of phosphorus at the catchment scale: model description", *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2(4):1359–1404.
- Koo B, O'Connell P(2006), "An integrated modelling and multicriteria analysis approach to managing nitrate diffuse pollution: 2. A case study for a chalk catchment in England", *Science of the total environment*, 358(1):1–20.
- Moriasi D, Arnold J, Van Liew M, Bingner R, Harmel R, Veith T (2007), "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations".
- Santhi C, Srinivasan R, Arnold J, Williams J(2006), "A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management

plans implemented in a watershed in Texas", Environmental Modelling & Software, 21(8):1141-1157.

Stålnacke P, Gooch G(2010), "Integrated Water Resources Management", Irrigation and Drainage Systems. 24(3):155-159.

Voinov A, Gaddis EJB(2008), "Lessons for successful participatory watershed modeling: A perspective from modeling practitioners", Ecological Modelling, 216(2):197-207.

국가수자원관리종합정보시스템 <http://www.wamis.go.kr/> :

보청천 유역 GIS 공간자료, 강우자료, 보은기상관측소 기상자료 ,
하수처리장 운영현황

국회법률지식정보시스템

<http://likms.assembly.go.kr/law/jsp/law/Main.jsp>

네이버 사전 서비스, <http://dic.naver.com/> : 속담/관용구, 도량

농촌진흥청 원클릭 농업기술 홈페이지 : 사과 과수원 시비량

보은군청 통계자료, 농림수산업 통계

<http://www.boeun.go.kr/BoeunContents.html?menucode=S01M020209>

유역 이미지 <http://prairierivers.org>

환경부 물환경정보시스템 <http://water.nier.go.kr> : 수질(총량측정망)

Arc Hydro Tools version 1.3 Final for ArcGIS 9.2/9.3

<http://support.esri.com/en/downloads/datamodel/detail/15>

NRCS website: National Conservation Practice Standards

http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/technical/alphabetical/ncps/?&cid=nrcs143_026849

Abstract

Water Quality Improvement Effects at the Watershed Scale from Upstream Catchment Management Practices

Hae-Jung Kim

Department of Environmental Planning
The Graduate School of Environmental Studies
Seoul National University

Watershed management has become globally recognized as a paradigm of effective water resource management that integrates water quality and quantity, human activity and the natural environment, and terrestrial and aquatic ecosystems. In South Korea, the Ministry of Environment initiated watershed management practices in the late 1990's by dividing the Korean geographical area into 4 major river basins - Han-river, Nakdong-river, Geum-river and Youngsan-Seomjin-River - and enforcing 'water management comprehensive countermeasures' in each of the basins. Integrated Water Resource Management (IWRM) is one of these applied countermeasures, wherein the primary principle is the active participation of diverse stakeholders at all levels of management

within the watershed. Watershed management can be an effective tool to arrive at watershed management goals in big scale watersheds, that is, at the level of basins, and to establish the specific watershed management practices by stakeholders in the small scale watershed, that is, at the level of catchments.

This research recommends the Dorang catchment as a suitable geographical scale in South Korea for the active participation of diverse watershed stakeholders. This is shown through the analysis of water quality improvements at the watershed scale as a result of specific management practices at the Dorang catchments, using a watershed model. The geographical size of a Dorang catchment is assumed as that which contains a typical South Korean rural village, wherein a Dorang is identified as a 1st or 2nd order stream in the 1:25,000 topographical map.

The study focuses on the Dorang catchments in the Bongcheon-stream watershed of the Geum-river basin. Using GIS Hydro Spatial Analyst, 1,148 Dorang catchments are abstracted in the Bocheong-stream watershed, which occupy 71.8% of the total watershed area. Of these, 338 Dorang catchments (29.9% of the watershed area) consist of rural residential areas where the residents can participate directly in the water management practices in their catchment. The average area of the mapped Dorang catchments is 0.35 km² and the average total length of each Dorang is 1.27 km.

The CAMEL (Chemicals, Agricultural Management and Erosion Losses), physically based, distributed, watershed model, has been utilized to analyze the effective water quality improvements, with a cell size of 100 m × 100 m and an hourly time step for input and output data. The following water quality indicators have been simulated: water flow, suspended sediment, COD, T-N, and T-P.

Initial model conditions were set using weather data for the year 2009 and iterating the model until the water storage change became stable, while observed data from 2010 were used to calibrate and that from 2011 to validate the model respectively.

The model was calibrated and validated with water flow data observed every ten minutes at the Kidae-bridge spot by the Geum-River Flood Control Office, and water quality data collected at Bochengcheon-3 spot every 8 days by the Ministry of Environment. The calibration and validation were matched satisfactorily for water flows and the model demonstrated the tendency of the water quality according to the pattern of precipitation. However, it was difficult to evaluate the statistical significance since the water quality data was not collected in the storm water events.

The scenario analyses for Dorang catchment managements were conducted with the validated model. Five management scenarios were analyzed, as follows: 1) a nutrient management plan with 50% reduction in compost and fertilizer in paddy fields, other fields and orchards; 2) point source pollution management with 100% reduction in livestock excrement by improving the excrement collection system; 3) soil erosion management by making dykes along fields; 4) soil erosion management by mulching the fields; 5) land use management by converting barren lands or marginal fields to grass land; as well as, 6) applying all of the preceding management actions together. It was estimated that the delivery loads of suspended sediment, COD, T-N and T-P would decrease by 4.71%, 26.2%, 14.0% and 33.2% respectively when all the scenarios were applied together. Among the five separate scenarios, the building of dykes was the most effective, followed by mulching of fields in reducing the pollutant delivery load; thus soil erosion management was revealed as the most important

factor in improving water quality. Land use management was seen as the least effective scenario since the area implied for this scenario was only 0.11% of the total watershed area.

keywords : *Dorang*, upstream, catchment management, water quality improvement, distributed watershed model, scenario analysis

Student Number : 2010-22309